

УДК 520.254+520.32

## Исследование алидадных уровней вертикального круга Ваншаффа

А. В. Бахонский

Приведены результаты исследований методом Васильева алидадных уровней вертикального круга Ваншаффа. Оценено влияние на измеренное зенитное расстояние изменения цены деления вдоль шкалы уровня и дан ряд практических рекомендаций с целью уменьшения этого влияния. Получены температурные коэффициенты изменения цены деления.

*INVESTIGATION OF ALIDADE LEVELS OF THE WANSCHAFF VERTICAL CIRCLE, by Bakhonskij A. V.*— A new comparator with optical calliper was used to study two second levels of the Wanschaff vertical circle. The results of investigation are presented. The influence of scale division change on measured zenith distance is estimated. A number of practical recommendations are given to decrease this influence. The temperature coefficients are obtained.

При определении зенитных расстояний звезд с помощью вертикального круга необходимо учитывать наклон вертикальной оси инструмента. На вертикальном круге Ваншаффа для этой цели имеются два алидадных уровня, исследования которых проводились более двадцати лет назад. Учитывая, что инструментальные параметры, в том числе параметры уровней, могут со временем изменяться, в 1983—1984 гг. были выполнены новые исследования этих уровней.

Исследования проведены методом Васильева [4] с использованием нового экзаменатора уровней, изготовленного в Опытном производстве ГАО АН УССР. Его особенностью является применение вертикального оптиметра вместо винтового микрометра в качестве устройства для определения угла наклона уровня, установленного на опорных площадках экзаменатора [1].

**Общая характеристика исследования.** Исследования проводились в феврале—марте 1983—1984 гг. при средних температурах  $+26^{\circ}$  и  $-4^{\circ}$ С, что позволило кроме средней цены деления определить также температурный коэффициент изменения цены деления.

Алидадные секундные уровни вертикального круга Ваншаффа представляют собой стеклянные ампулы, установленные на металлических платформах, закрытых металлическими коробками со стеклянными боковыми стенками для отсчетов шкал уровней. Шкала имеет 50 делений, расстояние между которыми 2 мм. На время исследований уровни вместе с коробками снимались с алидады и устанавливались на опорных площадках экзаменатора. При положительной температуре экзаменатор устанавливался в лабораторном помещении, при отрицательной — в павильоне вертикального круга на коллиматорном столбе. Для устранения влияния теплового воздействия исследователя положения концов пузырька отсчитывались дистанционно с помощью теодолита, установленного на расстоянии 3 м от экзаменатора с уровнем. Выбирались пасмурные дни, когда температура изменялась минимально. По проведенным измерениям ее изменение в течение одного ряда составило  $0.1^{\circ}$ — $0.2^{\circ}$ . Изменение длины пузырька ( $l$ ) в пределах одного ряда не превышало 0.15 делений уровня. Исследования проводились для трех длин пузырька: 18, 24 и 30 делений.

**Методика исследования.** При исследовании уровень устанавливался на опорные стойки и установочными винтами его пузырек выводился в начало шкалы. По подъемному винту оптиметр фиксировался в таком

положении, чтобы его начальный отсчет был в пределах  $\pm 50$  мкм. Затем с дискретностью приблизительно 3 деления уровня пузырька перемещался в прямом и обратном направлениях. Прямой и обратный ходы составляли один ряд измерений. Для каждой установки экзаменатора снимались отсчеты оптиметра и концов пузырька. Промежуток времени между последовательными установками экзаменатора составлял 1.5 минуты.

Согласно методу Васильева [4], число установок экзаменатора при прямом и обратном ходах должно быть одинаковым, и соответствующие пары установок должны иметь приблизительно равные отсчеты по шкале оптиметра. Номера последовательных установок при прямом и обратном ходах будем обозначать индексом  $i=1, 2, \dots, n$ , причем при прямом ходе номера возрастают, а при обратном убывают.

Пусть  $\beta_0$  — начальный отсчет оптиметра при прямом ходе в момент  $t_0$ ;  $x_0$  — положение середины пузырька уровня, соответствующее отсчету  $\beta_0$ ;  $y_i$  — сумма отсчетов левого и правого концов пузырька уровня;  $c$  — цена деления оптиметра (1 мкм = 0.3449");  $\tau$  — цена деления исследуемого уровня;  $P$  — величина, характеризующая несовершенство шлифовки внутренней поверхности ампулы.

В методе Васильева вводится коэффициент  $z$ , характеризующий влияние внешних условий на положение пузырька. Это величина перемещения пузырька уровня за одну минуту при условии неподвижности уровня. Методика исследования по методу Васильева строится таким образом, чтобы промежутки времени  $\Delta t$  между двумя последовательными установками экзаменатора были равными. Тогда для прямого хода имеем:

$$y_i^{np} = 2 \left[ x_0 + (\beta_0 - \beta_i^{np}) \frac{c}{\tau} + P + i \Delta t z \right] + \lambda_i^{np}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i^{np}$  — погрешности определения положений концов пузырька уровня.

Для прямого и обратного ходов величина  $P$  имеет противоположный знак, поэтому можно принять, что

$$y_i^{ob} = 2 \left[ x_0 + (\beta_0 - \beta_i^{ob}) \frac{c}{\tau} - P + (2n + 1 - i) \Delta t z \right] + \lambda_i^{ob}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим:

$$\frac{y_i^{np} + y_i^{ob}}{4} = x_0 + \left( \beta_0 - \frac{\beta_i^{np} + \beta_i^{ob}}{2} \right) \frac{c}{\tau} + \frac{2n + 1}{2} \Delta t z + \frac{\lambda_i^{np} + \lambda_i^{ob}}{4}, \quad (3)$$

$$\frac{y_i^{np} - y_i^{ob}}{4} = \frac{\beta_i^{ob} - \beta_i^{np}}{2} \frac{c}{\tau} + P + \left( i - \frac{2n + 1}{2} \right) \Delta t z + \frac{\lambda_i^{np} - \lambda_i^{ob}}{4}. \quad (4)$$

Обозначим:

$$B_i = \frac{\beta_i^{np} + \beta_i^{ob}}{2}; \quad \Delta B_i = \frac{\beta_i^{ob} - \beta_i^{np}}{2}; \quad Y_i = \frac{y_i^{np} + y_i^{ob}}{4}; \quad \delta_i = - \frac{\lambda_i^{np} + \lambda_i^{ob}}{4};$$

$$\Delta Y_i = \frac{y_i^{np} - y_i^{ob}}{4}; \quad \gamma_i = \frac{\lambda_i^{np} - \lambda_i^{ob}}{4}; \quad X_0 = x_0 + \frac{2n + 1}{2} \Delta t z.$$

В этих обозначениях после несложных преобразований формулы (3) и (4) примут вид:

$$X_0 + (\beta_0 - B_i) \frac{c}{\tau} - Y_i = \delta_i, \quad (5)$$

$$P + \left( i - \frac{2n + 1}{2} \right) \Delta t z - \left( \Delta Y_i - \Delta B_i \frac{c}{\tau} \right) = \gamma_i. \quad (6)$$

Решая уравнения (5) и (6) методом наименьших квадратов, находим  $X_0$ ,  $\tau$ ,  $P$  и  $z$ . Необходимо отметить, что хотя в (5) входит величина  $z$ , она входит в качестве постоянной величины в  $X_0$ . В (6) член  $\Delta B_i \frac{c}{\tau}$  мал (так как соответствующие отсчеты по оптиметру для прямого и обратного хода приблизительно равны), и поэтому для определения  $P$  и  $z$  не требуется высокая точность знания величины  $\tau$ .

**Результаты исследования.** В табл. 1 приведены решения уравнений (5) и (6). В колонках 5, 7, 9 приведены средние квадратичные ошибки величин  $\tau$ ,  $P$  и  $z$ . По данным табл. 1 были найдены следующие зависимости цены деления уровней от температуры:

$$\begin{aligned} \text{для уровня № 10888 (нижнего)} \quad \tau &= 1.133'' - 0.0018'' t^\circ, \\ \text{для уровня № 10889 (верхнего)} \quad \tau &= 1.077'' - 0.0007'' t^\circ. \end{aligned}$$

Таблица 1. Результаты исследований уровней вертикального круга Ваншаффа

$T$ °C	$l_{\text{ср}}$	$x_0$	$\tau$	$\delta(\tau)$	$P$	$\delta(P)$	$z$	$\delta(z)$
Уровень № 10888								
-3.7	30.22	15.41	1.133''	$\pm 0.001''$	0.04	$\pm 0.03$	0.007	$\pm 0.005$
-3.7	30.27	15.44	1.131	$\pm 0.001$	0.04	$\pm 0.02$	0.008	$\pm 0.004$
26.1	30.15	16.15	1.077	$\pm 0.002$	-0.04	$\pm 0.03$	-0.012	$\pm 0.005$
26.0	30.16	16.51	1.089	$\pm 0.001$	0.00	$\pm 0.02$	-0.013	$\pm 0.004$
-3.6	24.22	12.76	1.135	$\pm 0.001$	-0.06	$\pm 0.03$	-0.007	$\pm 0.004$
-3.7	24.26	13.12	1.144	$\pm 0.001$	-0.09	$\pm 0.03$	-0.016	$\pm 0.005$
26.2	24.06	12.54	1.073	$\pm 0.001$	0.01	$\pm 0.03$	0.017	$\pm 0.005$
26.2	24.12	12.89	1.080	$\pm 0.002$	-0.01	$\pm 0.03$	0.004	$\pm 0.005$
-3.4	20.45	11.09	1.134	$\pm 0.002$	-0.01	$\pm 0.04$	0.000	$\pm 0.005$
26.2	18.32	9.24	1.085	$\pm 0.003$	-0.10	$\pm 0.04$	-0.001	$\pm 0.008$
Уровень № 10889								
-3.8	31.00	15.46	1.075	$\pm 0.003$	0.00	$\pm 0.02$	-0.014	$\pm 0.004$
-3.8	31.02	15.78	1.086	$\pm 0.003$	0.00	$\pm 0.03$	-0.013	$\pm 0.006$
26.2	29.50	15.60	1.055	$\pm 0.002$	0.00	$\pm 0.01$	-0.005	$\pm 0.002$
26.1	29.56	15.58	1.053	$\pm 0.002$	-0.08	$\pm 0.02$	-0.016	$\pm 0.003$
-3.6	24.38	13.87	1.079	$\pm 0.002$	-0.03	$\pm 0.04$	-0.013	$\pm 0.006$
26.2	24.78	13.97	1.065	$\pm 0.002$	-0.12	$\pm 0.03$	-0.005	$\pm 0.005$
26.2	24.78	14.05	1.062	$\pm 0.002$	-0.14	$\pm 0.02$	-0.009	$\pm 0.003$
-3.5	17.97	10.04	1.053	$\pm 0.003$	0.01	$\pm 0.06$	0.031	$\pm 0.008$
26.2	18.14	10.16	1.065	$\pm 0.003$	-0.06	$\pm 0.03$	0.002	$\pm 0.004$

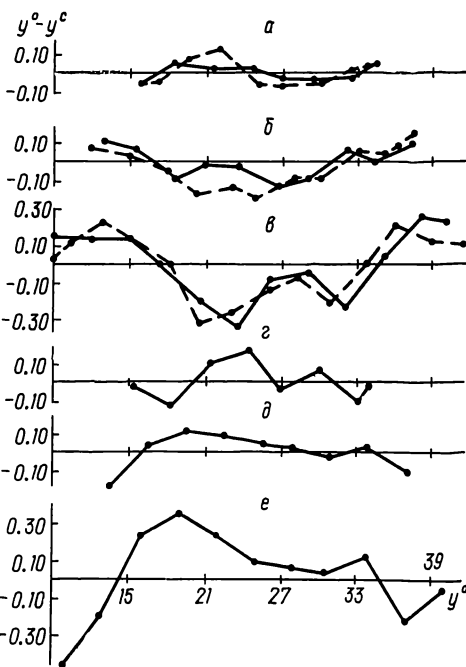
Примечание: величины  $l_{\text{ср}}$ ,  $x_0$ ,  $P$ ,  $\delta P$ ,  $z$ ,  $\delta z$  даны в делениях уровня.

При выводе второй зависимости не использовались два последних значения цены деления, поскольку температурный коэффициент изменил знак, что, по-видимому, связано с особенностями самого уровня.

Для обоих уровней коэффициент  $P$ , характеризующий качество шлифовки внутренней поверхности ампул уровней, мал и по абсолютной величине в среднем равен 0.05 деления уровня.

Подставляя в уравнения (1) и (2) для каждого ряда исследований найденные значения  $\tau$ ,  $P$  и  $z$ , получим остаточные уклонения в виде разности  $y^0 - y^c$  наблюдаемого  $y^0$  и вычисленного  $y^c$  по одной из формул (1) или (2) положений центра пузырька по шкале уровня. В качестве примера в табл. 2 приведены остаточные уклонения для уровня № 10889 при длине пузырька, равной 31 делению, для четырех рядов исследований. Эти уклонения показывают вполне определенный систематический ход, который практически не меняется для двух различных значений температур:  $+26^\circ$  и  $-4^\circ$ , при которых проводились исследования. Те же самые, только усредненные по четырем рядам, уклонения для обоих уровней приведены на рисунке. По оси ординат отложены величины  $y^0 - y^c$  (в делениях уровня), усредненные по четырем рядам

исследований. Как и из табл. 2, можно сделать вывод о реальности изменения цены деления уровня в зависимости от положения пузырька. Исключив из отдельных значений табл. 2 средние по столбцам, получим новые остаточные уклонения, которые должны быть только погрешностями определений положений концов пузырька  $\lambda_i$ , т. е. случайными величинами (табл. 3). Нормальность распределения этих уклонений была проверена по асимметрии и эксцессу [3]. По новым уклонениям была найдена средняя квадратичная ошибка  $\sigma$  определения положения концов пузырька:  $\sigma =$



$$= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{64} \lambda_i^2} = \pm 0,05 \text{ делений}$$

уровня, где  $n=64$  — число уклонений.

Сравнивая уклонения для двух уровней, можно отметить, что в целом по абсолютной величине они меньше для уровня № 10888, а следовательно, для него меньше и изменение цены деления. Это подтверждает результаты исследований А. С. Харина для этих же уровней [5].

Ход средних остаточных уклонений по шкале уровней: кривые *a, б, в* относятся к уровню № 10888 и длинам пузырьков 30, 24, 18 делений соответственно; кривые *г, д, е* — к уровню № 10889 и тем же длинам пузырьков. Сплошной линией показаны результаты исследований 7—10 февраля 1984 г., пунктирной — 16 апреля 1983 г. ( $y^0 - y^c$  и  $y^0$  — в делениях уровня)

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением кривых остаточных уклонений, полученных в 1983 и 1984 гг., для уровня № 10888.

Сравнивая характер изменения остаточных уклонений для двух уровней при длине пузырька 18—20 делений, можно отметить, что в целом эти изменения имеют противоположный знак, а следовательно, противоположный знак имеют и поправки к средней цене деления. В среднем для двух уровней, если положения пузырьков окажутся близкими

Таблица 2. Значения остаточных уклонений (в делениях шкалы) для верхнего уровня (№ 10889)

$\bar{y}^0$ (в делениях уровня)								Примечание
15.5	18.5	21.5	24.0	27.0	30.0	33.0	34.0	
0.02	-0.22	0.11	0.14	-0.12	0.15	-0.13	-0.03	Прямой ход, $t = -3.7^\circ$
-0.09	-0.13	0.11	0.18	-0.01	0.04	-0.19	0.01	
0.01	-0.20	0.07	0.26	-0.04	0.19	-0.18	-0.03	Обратный ход, $t = -3.7^\circ$
0.00	-0.24	0.05	0.31	0.10	-0.01	-0.13	-0.02	
-0.04	-0.15	0.16	0.13	-0.04	0.00	-0.04	-0.04	Прямой ход, $t = 26.2^\circ$
-0.05	-0.11	0.11	0.08	-0.08	0.10	-0.12	-0.02	
-0.08	-0.11	0.14	0.17	0.00	0.00	-0.06	-0.04	Обратный ход, $t = 26.2^\circ$
0.03	-0.15	0.13	0.12	-0.08	0.06	-0.04	0.01	
Среднее								
-0.02	-0.16	0.11	0.18	-0.03	0.07	-0.11	-0.02	

друг к другу (в пределах двух делений), поправки, вследствие изменения цены деления, будут компенсироваться. Если же это условие не выполняется, то максимальное значение этой ошибки может быть оценено.

Для этого путем подстановки  $\tau$ ,  $P$  и  $z$  в уравнение (1) найдем вычисленное положение середины пузырька уровня  $y_i^c = x_0 + (\beta_0 - \beta_i) \frac{c}{\tau} + P + i\Delta tz$ , а также наблюдаемое положение  $y_i^0 = x_0 + (\beta_0 - \beta_i) \frac{c}{\tau + \Delta\tau} + P + i\Delta tz + \lambda_i$ , где  $\Delta\tau$  — поправка к средней цене деления уровня;  $\lambda_i$  — ошибка в определении положений концов пузырька. Предполагается, что при усреднении по четырем рядам  $\lambda_i = 0$ .

Таблица 3. Новые значения уклонений  $y^0$  (в делениях шкалы) для верхнего уровня (№ 10889)

15.5	18.5	21.5	24.0	27.0	30.0	33.0	34.0
0.04	-0.06	0.00	-0.04	-0.09	0.08	-0.02	-0.01
-0.07	0.03	0.00	0.01	0.02	-0.03	-0.08	0.03
0.03	-0.04	-0.04	0.08	-0.01	0.12	-0.07	-0.01
0.02	-0.08	-0.06	0.13	0.13	-0.08	-0.02	0.00
-0.02	0.01	0.05	-0.05	-0.01	-0.07	0.07	-0.02
-0.03	0.05	0.00	-0.10	-0.05	0.03	-0.01	0.00
-0.06	0.05	0.03	-0.01	0.03	-0.07	0.05	-0.02
0.05	0.01	0.02	-0.06	-0.05	-0.01	0.07	0.03

Вычитая из первого уравнения второе, после несложных преобразований получим  $\Delta\tau_i = -\frac{(y^0 - y^c)_i}{(y^0 - y^c)_i\tau + (\beta_0 - \beta_i)c} \tau^2$ . Поскольку  $(\beta_0 - \beta_i)c = (y_i^c - x_0)\tau$ , то окончательно имеем:

$$\Delta\tau_i = -\frac{(y^0 - y^c)_i}{y_i^0 - x_0} \tau. \quad (7)$$

При наблюдениях на вертикальном круге поправка  $\Delta i_1$  за изменение наклона вертикальной оси определяется по формуле [6]:

$$\Delta i_1 = \frac{1}{8} \{[(L + \Pi)_н^в - (L + \Pi)_н^з] \tau + [(L + \Pi)_в^в - (L + \Pi)_в^з] \tau\},$$

где  $L$ ,  $\Pi$  — отсчеты концов пузырька для нижнего (№ 10888) и верхнего (№ 10889) уровней при двух положениях инструмента (круг «восток» и круг «запад»);  $\tau = 1.054''$ , причем для обоих уровней использовалось одно и то же значение  $\tau$ , в котором не учитывался температурный коэффициент.

Для реального уровня, когда цена деления меняется по длине ампулы, можно записать аналогично:

$$\Delta i_2 = \frac{1}{8} \{[(L + \Pi)_н^в - (L + \Pi)_н^з] (\tau + \Delta\tau_н) + [(L + \Pi)_в^в - (L + \Pi)_в^з] (\tau + \Delta\tau_в)\}.$$

Тогда наблюдаемое зенитное расстояние будет содержать ошибку за счет изменения цены деления

$$\Delta i = \Delta i_2 - \Delta i_1 = \frac{1}{8} \{[(L + \Pi)_н^в - (L + \Pi)_н^з] \Delta\tau_н + [(L + \Pi)_в^в - (L + \Pi)_в^з] \Delta\tau_в\}. \quad (8)$$

В наиболее неблагоприятном случае при длине пузырька 20 делений отсчет его центра для нижнего уровня равен 15.0, для верхнего — 19.0 делений (рисунок). Тогда из (7) получим  $\Delta\tau_н = -0.032''$ ,  $\Delta\tau_в =$

$= -0.043''$ . При наблюдениях на вертикальном круге величина в квадратных скобках равенства (8) не превышает двух делений. Поэтому  $\Delta i = -0.02''$ .

В заключение приведем значения цены деления уровней вертикального круга Ваншаффа, полученные по трем различным исследованиям (табл. 4). Цена деления в третьей строчке табл. 4 получена отдельно для левой, центральной и правой частей уровня при температуре  $+20^\circ\text{C}$  [5]. Средняя цена деления для всей шкалы была определена как среднее арифметическое из трех ее значений и приведена к  $0^\circ\text{C}$ .

**Таблица 4. Результаты определений цены деления уровней вертикального круга Ваншаффа**

Уровень		Примечание
№ 10888	№ 10889	
1.133"	1.077"	Данная работа [2] [5]
1.067	1.060	
1.049	1.022	

По проведенным исследованиям разность цены деления верхнего и нижнего уровней оказалась заметной величиной и составила  $0.056''$  (у А. К. Короля — лишь  $0.007''$  [2]).

Оценим, как изменится поправка к наблюдаемым зенитным расстояниям, если вместо принятой в настоящее время цены деления ( $\tau = 1.054''$  для обоих уровней) ввести цену деления, полученную из проведенных исследований. Подставив в (8)  $\Delta\tau_n = -0.079''$  и  $\Delta\tau_b = -0.023''$ , получим  $\Delta i = -0.03''$ .

Если при переключке инструмента пузырек «уходит» на два и более делений и пузырьки уровней находятся в таких положениях относительно друг друга, что изменения цены деления неблагоприятным образом суммируются, то в наблюдаемые зенитные расстояния может вноситься ошибка  $0.10''$  и более, что является заметной величиной.

**Выводы.** 1. Уровни вертикального круга Ваншаффа не имеют резких неровностей на внутренней поверхности ампулы. 2. При малых длинах пузырька (меньше 20 делений) заметна зависимость цены деления пузырька от его положения по длине ампулы, что, по-видимому, связано с отклонением внутренней поверхности ампулы от точной сферы. Поэтому оптимальной, с точки зрения постоянства цены деления, является длина пузырька 25—30 делений. 3. При наблюдениях необходимо следить за тем, чтобы отсчеты центров пузырьков нижнего и верхнего уровней не отличались друг от друга более, чем на 1—2 деления и находились вблизи центра ампулы. 4. Наклон вертикальной оси инструмента должен регулироваться так, чтобы пузырек при установке инструмента во второе положение «уходил» не более чем на одно деление.

1. Бахонский А. В., Самойлов В. С. Экзаменатор уровней с оптиметром.— Кинематика и физика небесных тел, 1985, 1, № 3, с. 83—84.
2. Король А. К. Склонения ярких и слабых фундаментальных звезд в единой системе.— Киев: Наук. думка, 1969.— 242 с.
3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений.— М.: Наука, 1968.— 288 с.
4. Товчигречко С. С. Уровни и методы их исследования.— М.: Изд-во стандартов, 1965.— 108 с.
5. Харин А. С. Способ совместного определения цены деления уровня и периодических ошибок винта экзаменатора.— В кн.: Вопросы астрометрии. Киев: Наук. думка, 1966, с. 107—110.
6. Харин А. С., Ненахова Е. М., Лазоренко П. Ф. Модернизация вертикального круга Ваншаффа и результаты наблюдений Солнца и больших планет в 1970—1977 гг.— Киев: Наук. думка, 1980.— 96 с.