

ОПТИМАЛЬНАЯ ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ НА СТАНЦИИ ПРИ ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

Правильно выбранная программа наиболее симметричных отсчетов и максимальное сокращение времени между ними дают возможность компенсировать или ослабить многие систематические и случайные ошибки нивелирования. Например, значительно ослабляются ошибки, связанные с постепенными изменениями i угла от тепловых воздействий [3], некоторые рефракционные влияния, систематические изменения в перемещении костылей и штатива [1].

Мы взяли три симметричных программы, при которых средние из отсчетов по каждой из реек приходится на один и тот же момент времени и которые можно считать относящимися к одному горизонту инструмента, и одну не симметричную, но с наиболее короткими промежутками времени между отсчетами по рейкам и произвели полевые исследования.

Эта работа посвящена вопросу, какая из программ дает лучшие результаты нивелирования и является вместе с тем наиболее производительной.

В табл. 1 дается условная запись программ. Условные обозначения: З, П — задняя и передняя рейки; о, д — основная и дополнительная шкала; п, л — правая и левая линия нивелировки.

Таблица 1

Программы нивелирования

№ программы	Станции	Порядок работы на станции							
	нечетная	$З_о^п$	$П_о^п$	$П_д^п$	$П_д^п$	$З_о^л$	$П_о^л$	$П_д^л$	$З_д^л$
	четная	$П_о^п$	$З_о^п$	$З_д^п$	$П_д^п$	$П_о^л$	$З_о^л$	$З_д^л$	$П_д^л$
I	нечетная	$З_о^п$	$П_о^п$	$П_д^п$	$З_д^п$	$З_д^л$	$П_д^л$	$П_о^л$	$З_о^л$
	четная	$П_д^п$	$З_д^п$	$З_о^п$	$П_о^п$	$П_о^л$	$З_о^л$	$З_д^л$	$П_д^л$
III	нечетная	$З_о^п$	$П_о^п$	$П_д^п$	$З_д^п$	$З_д^л$	$П_д^л$	$П_о^л$	$З_о^л$
	четная	$П_д^п$	$З_д^п$	$З_о^п$	$П_о^п$	$П_о^л$	$З_о^л$	$З_д^л$	$П_д^л$
IV	нечетная	$З_о^п$	$З_д^п$	$П_о^п$	$П_д^п$	$З_о^л$	$З_д^л$	$П_о^л$	$П_д^л$
	четная	$П_о^п$	$П_д^п$	$З_о^п$	$З_д^п$	$П_о^л$	$П_д^л$	$З_о^л$	$З_д^л$

Характеристика программ:

I — программа, утвержденная инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов в СССР. Эта программа симметрична в отношении задней и передней реек, но не симметрична в отношении шкал (основной и дополнительной) и в отношении правой и левой нивелировок.

II — программа симметрична в отношении реек и шкал, но не симметрична в отношении правой и левой нивелировок.

III — программа полностью симметрична.

IV — не симметрична совсем, но наблюдения по этой программе выполняются на три-четыре минуты быстрее, чем по первым трем.

Подбор программ нивелирования, исключаяющей или ослабляющей все ошибки нивелирования, — вопрос сложный и исследованьем по какой-либо одной методике не решается. Ошибки от разных источ-

ников при нивелировании входят в превышения суммарной величиной, которая чрезвычайно изменчива, ввиду своей зависимости от состояния источников на данный момент времени.

Наше исследование было ограничено выявлением оптимальной программы, ослабляющей самые крупные ошибки нивелирования: 1) суммарные ошибки от тепловых воздействий на нивелир и рефракции; 2) ошибки вертикальных перемещений костылей.

Была принята методика раздельного исследования. Для этого линия длиной 200 м, уклоном около 0,017, ориентированная в направлении «запад—восток» была закреплена временными реперами через 25 м,

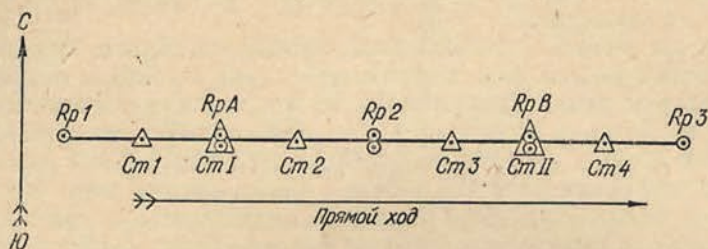


Схема расположения реперов и станций.

так чтобы образовалась правая и левая линии нивелирования. Схема закрепления дана на рисунке.

Временные репера представляют собой деревянные столбы длиной 1 м и диаметром 15—17 см, вкопанные вровень с землей. В нижних основаниях столбов для устойчивости укрепляются якоря, а в верхние торцы вбиваются малые нивелирные костыли.

Такое закрепление почти полностью исключает ошибки от вертикальных перемещений костылей, что очень важно в принятой нами методике раздельного исследования. Сущность ее состоит в том, что устраняются или значительно ослабляются источники всех возможных ошибок, кроме исследуемого, условия которого, наоборот, принимаются такими, чтобы величины ошибок от его влияния получались наибольшими, тогда они лучше проявляются и обнаруживают механизм их накопления или компенсации.

Именно последними рассуждениями мы и руководствовались при выборе ориентировки линии, так как направление «запад—восток» гораздо больше, чем все другие, подвержено влиянию ошибок односторонних тепловых воздействий.

Ошибки, связанные с вертикальными перемещениями штатива нивелира, ослаблялись установкой нивелира на всех станциях на заранее вкопанные вровень с землей деревянные столбы.

Все исследования делятся на три части. В первой части нивелирование линии производилось с двух станций (I и II), по временным реперам нивелиром НА-1, защищенным только зонтом, в периоды с 5³⁰ до 11³⁰ и с 15⁰⁰ до 21⁰⁰ часов дня. Наблюдения продолжались четыре дня, и на каждой станции велись по вышеописанному четырем программам. Половина наблюдений была сделана в прямом направлении, а вторая половина — в обратном (первый и третий дни — прямой ход; второй и четвертый — обратный ход). В начале и конце наблюдений по каждой программе записывалось время.

Наблюдения на одной станции по одной программе продолжались в среднем 10 мин, четырьмя программами — 40 мин; работа на двух станциях выполнялась за 1 час 20 минут. Полный цикл работы на двух станциях с небольшим отдыхом и подготовкой к новому циклу длился

1 час 30 минут. Всего за день выполнялось восемь циклов (четыре утром и четыре вечером). За четыре дня выполнено 32 цикла.

В начале и конце работы на каждой станции, на высотах 0,5 м и 2,5 м над землей, возле инструмента психометрическими термометрами измерялась температура воздуха. На высоте 1,5 м анемометром измерялась скорость ветра. Визуально фиксировались всякие изменения погоды, особенно облачности по линии створа с Солнцем.

Во второй части исследований нивелирование линии велось с четырех станций по трем парам костылей, вбиваемых каждый раз заново после наблюдений по каждому циклу, на некотором удалении от реперов RpA , $Rp2$, RpB , так как вблизи реперов структура грунта была нарушена при их закладке.

Грунт на участке исследований состоял из сухого, средней твердости суглинка с небольшим содержанием песка и мелкой гальки.

Нивелир и рейки применялись те же, что и в первой части исследования, но нивелир защищался от воздействий среды термозащитным кожухом и зонтом — навесом, которые использовались нами в исследованиях прошлых лет [2]. Такая термозащита дает возможность уменьшить ошибки влияния тепловых воздействий в три-четыре раза.

Увеличение количества станций вызвано было необходимостью увеличения ошибки изменения высот костылей и уменьшения некоторых других ошибок: тепловых воздействий, рефракции, отсчета и других.

Наблюдения велись в те же периоды дня, что и в первой части работы и продолжались четыре дня, но поскольку на выполнение цикла четырьмя программами нужно было более 2,5 час, то пришлось два дня проводить наблюдения по программам I и II (прямой и обратный ход), а два дня — по программам III и IV. Наблюдения времени и метеоэлементов выполнялись так же, как и в первой части исследования.

Третья часть исследований производилась с четырех станций для получения вероятнейшего значения превышения ($h_{\text{вер}}$) между реперами $Rp1$ и $Rp3$ и велась путем нивелирования линии в прямом и обратном направлении нивелиром в термозащитном кожухе, с постановкой реек на временные репера. Такие наблюдения продолжались два дня (первый день — прямой ход; второй день — обратный) и велись по программе III, так как еще в первую и вторую части исследований было замечено ее преимущество перед другими программами, которое выражалось, в основном, в меньших колебаниях одноименных превышений, получаемых в течение дня.

Цикл работы при этом на четырех станциях длился 40 мин, поэтому за день в наилучшие для нивелирования периоды с 6³⁰ до 9⁵⁰ и с 16 до 20 часов выполнялось 11 циклов (пять — утром и шесть вечером). Всего за два дня получено 22 цикла, из которых и выведено вероятнейшее превышение между реперами $Rp1$ и $Rp3$

$$h_{\text{вер}} = +3402,32 \text{ мм},$$

с ошибками $\eta = \pm 0,01 \text{ мм/км}$ и $\sigma = +0,004 \text{ мм/км}$, где η и σ — случайная и систематическая ошибки получены по известным формулам Звонова—Ларина, при этом 200-метровый участок (четыре станции) считался секцией, а произведение количества дневных циклов на 200 м — линией, то есть нивелирование за один день считалось непрерывным ходом в 2,2 км.

При обработке первой и второй частей исследований были прежде всего составлены суммы превышений между реперами $Rp1$ и $Rp3$ по каждой программе в отдельности. Затем составлены ведомости превышений между ними на каждый день и для каждого 1,5-часового периода. На основании каждодневных ведомостей путем осреднения превышений одноименных периодов получены сводные ведомости.

Средние из четырех ходов превышения между реперами 1 и 3 и оценка точности программ при нивелировании по временным реперам (нивелир под зонтом), $h_{\text{пер.}} = 3402,32 \text{ м}$

Периоды наблюдений	Затраты времени на станции (W)	Программы															
		I				II				III				IV			
		h_1 , м.м.	d_1 в сотых м.м.	v_1 в сотых м.м.	Затр. врем. на ст.	h_{II} , м.м.	d_2 в сотых м.м.	v_2 в сотых м.м.	Затр. врем. на ст.	h_{III} , м.м.	d_3 в сотых м.м.	v_3 в сотых м.м.	Затр. врем. на ст.	h_{IV} , м.м.	d_4 в сотых м.м.	v_4 в сотых м.м.	
$5^{\text{о}} - 7^{\text{о}}$	10м,05с	3402,82	+50	+55	10,15	3402,63	+31	+35	10,25	3402,45	+13	+11	8,00	3402,46	+14	+20	
$7^{\text{о}} - 8^{\text{о}}$	10,00	2,43	+11	+17	10,10	2,59	+27	+30	10,15	2,40	+8	+7	7,15	2,35	+3	+10	
$8^{\text{о}} - 10^{\text{о}}$	9,30	2,20	-12	-7	9,58	2,33	+1	+5	10,00	2,24	-8	-10	6,10	2,22	-10	-4	
$10^{\text{о}} - 11^{\text{о}}$	9,50	2,12	-20	-14	10,02	2,00	-32	-28	10,12	2,13	-19	-20	6,18	1,97	-35	-28	
$15^{\text{о}} - 16^{\text{о}}$	10,06	1,74	-58	-52	10,25	1,85	-47	-43	10,37	2,21	-11	-12	7,40	2,06	-26	-19	
$16^{\text{о}} - 18^{\text{о}}$	10,10	2,16	-16	-10	10,16	2,32	0	+4	10,21	2,25	-7	-9	7,10	2,14	-18	-11	
$18^{\text{о}} - 19^{\text{о}}$	9,20	2,28	-4	+2	9,30	2,29	-3	+1	10,00	2,36	+4	+3	6,15	2,19	-13	-7	
$19^{\text{о}} - 21^{\text{о}}$	10,00	2,37	+5	+10	9,48	2,25	-7	-4	9,50	2,64	+32	+30	6,22	2,64	+32	+38	
$W_{\text{ср.}} \text{ мин., сек.}$	9,52	1,08 м.м.			10,03	0,79 м.м.			10,13	0,51 м.м.			6,54	0,67 м.м.			
Колесание h			-0,44				-0,30				+0,12				-0,53		
$[d_i]$ (м.м.)			-0,055				-0,037				+0,015				-0,066		
Системат. часть			0,6467				0,4816				0,1804				0,3275		
$[sv]$																	
$m_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{[sv]}{n}}$				$\pm 0,28$				$\pm 0,25$				$\pm 0,15$				$\pm 0,20$	
$m_{\text{км}} = m_{\text{ст}} \sqrt{10}$				$\pm 0,84$				$\pm 0,75$				$\pm 0,46$				$\pm 0,61$	

Для первой части исследований сводная ведомость четырех дней наблюдений дана в табл. 2.

В сводных ведомостях вычислены уклонения (d_i) каждого превышения (h_i) от вероятнейшего ($h_{\text{вер.}}$)

$$d_i = h_i - h_{\text{вер.}}$$

Из каждого ряда уклонений, соответствующих каждой программе, выделена систематическая часть ошибок, как $\frac{\sum d_i}{n}$, а по оставшимся

случайным ошибкам $v_i = d_i - \frac{\sum d_i}{n}$ вычислены среднеквадратические ошибки работы на одной станции по каждой программе $m_{\text{ст}} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}}$, где n — число ошибок. Вычислены также среднеквадратические

ошибки на 1 км хода ($m_{\text{км}}$) $m_{\text{км}} = \pm m_{\text{ст}}/10$. Все результаты вычислений для первой части исследований записаны в конце табл. 2.

Для второй части исследований приводится только сводная ведомость результатов (табл. 3).

В ы в о д ы. Из первой части исследований:

1. Максимальные колебания превышений за день получаются при нивелировании по программе I ($\approx 1,1$ мм); по программам II и IV они одинаковы (до 0,8 мм); при работе по программе III до 0,5 мм.

2. Систематические ошибки лучше компенсируются при применении программ II и III, а случайные I и IV.

Таблица 3

Оценка точности программ работы на станции при высокоточном нивелировании по костылям (нивелир в термозащитном кожухе)

	Программы			
	I	II	III	IV
Время, затрачиваемое на одной станции	9 мин 49 с	9 мин 56 с	10 мин 10 с	6 мин 46 с
Колебания превышений за день работы (мм)	0,47	0,39	0,21	0,72
Систематическая часть ошибок	0,022	0,019	0,006	0,020
Среднеквадратическая случайная ошибка работы на первой станции	$\pm 0,10$	$\pm 0,12$	$\pm 0,11$	$\pm 0,18$
Среднеквадратическая ошибка на 1 км хода	$\pm 0,31$	$\pm 0,37$	$\pm 0,34$	$\pm 0,56$

3. Время наблюдений на одной станции при нивелировании I класса при применении программы IV — 6,5 мин. Наблюдения по программам I, II и III выполняются за 10 мин.

Из второй части исследований: 1. Максимальные колебания превышений за день работы дает программа IV — 0,7 мм; минимальные — программа III — 0,2 мм.

2. Систематическая часть ошибок очень хорошо компенсируется при работе по программе III; при применении программ I, II, IV систематические части ошибок почти одинаковы.

3. Случайные ошибки одинаковы при применении программ I, II, III, а для программы IV они незначительно больше.

Отсюда следует, что в высокоточном нивелировании целесообразно было бы применять программу III. В коротких ходах высокоточного нивелирования, предназначенных для инженерных целей, а также при

нивелировании II класса может с успехом применяться асимметричная программа IV.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кметко И. Н. Исследование вертикальных перемещений нивелирных костылей и башмаков. — В кн.: 50 лет Ленинского декрета об учреждении ВГУ. Труды конференции. Изд-во Львовского ун-та, 1970.
2. Патова З. Ф. Некоторые усовершенствования в методике высокоточного нивелирования. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка». 1971, вып. 13.
3. Энтин И. И. Высокоточное нивелирование. Труды ЦНИИГАиК, 1956, вып. 111.

Работа поступила в редколлегию 17 мая 1973 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.
