

В. В. МИРНЫЙ, канд. техн. наук  
Ю. Н. ГАВРИЛЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ БОРТОВ ГОРНЫХ КАРЬЕРОВ

Маркшейдерские наблюдения за деформациями бортов карьеров, расположенных в горной местности, сопряжены с целым рядом трудностей. Значительные углы наклона поверхности и сильная изрезанность рельефа особенно осложняют задачу определения вертикальных смещений. Считается, что для этих условий наиболее приемлемым является тригонометрическое нивелирование. Оно может обеспечить довольно высокую точность при использовании светодальномеров для линейных измерений, но его выполнение сильно затруднено погодными условиями, особенно в весенние и осенние месяцы (туман, низкая облачность, обилие осадков и т. д.). Учитывая, что в эти периоды активизируются оползневые явления, наблюдения необходимо проводить в сжатые сроки методами, которые мало зависят от неблагоприятных метеорологических условий.

Геометрическое нивелирование можно выполнять даже в условиях ограниченной видимости, но при углах наклона до  $10\text{--}15^\circ$  [1]. Для решения вопросов точности и трудоемкости данного вида нивелирования при углах наклона  $25\text{--}35^\circ$  авторами выполнено нивелирование реперов наблюдательной станции западного борта Каджаранского карьера, который разрабатывает месторождение в сложных рельефных и климатических условиях высокогорной местности.



№ хода по рисунку	Длина хода, км	Число штативов в ходе	Невязка, мм	
			фактическая	допустимая
1	2,20	68	-5	16,5
2	1,75	59	-1	15,3
3	1,83	58	-12	15,2
4	2,58	63	-10	15,8
5	1,96	51	-2	14,3
6	1,83	72	+12	17,0
7	1,55	66	-6	16,2
8	0,47	30	+6	11,0
9	1,94	71	+3	16,9
10	1,55	115	-16	21,5
11	1,17	95	0	19,5
12	1,64	114	-12	21,4

Уравнивание системы выполнено двумя способами: способом условных измерений и способом посредственных измерений на ЭЦВМ «Минск-22» по программе, рекомендованной в работе [2]. Расхождения в отметках узловых точек очень незначительные, что говорит о возможности применения любого метода. Средняя квадратическая ошибка единицы веса, т. е. ошибка определения одного превышения, составила по результатам уравнивания — 1,3 мм.

При уравнивании нивелирных сетей, предназначенных для определения смещений, очень важно оценить точность определения отметок реперов относительно некоторых исходных. Такую оценку можно легко выполнить, если известна матрица весовых коэффициентов уравниваемых величин [3].

Матрица при уравнивании по способу условных измерений определяется по формуле

$$Q = P^{-1} - P^{-1}A^T N^{-1}AP^{-1}, \quad (2)$$

где  $A$  — матрица коэффициентов условных уравнений;  $P$  — весовая матрица этих наблюдений;  $N$  — матрица коэффициентов нормальных уравнений.

Соответствующая матрица при параметрическом методе уравнивания получается непосредственно при обращении матрицы нормальных уравнений:

$$Q = N^{-1} \quad (3)$$

На основании формулы (3) авторы произвели оценку точности рассматриваемой сети относительно исходных реперов наблюдательной станции. Значения полученных ошибок  $m$  приведены в табл. 2. Максимального значения они достигают в середине системы и не превышают 25 мм (см. табл. 1 и рисунок). Ошибки отметок реперов относительно опорных реперов профильных линий будут еще меньше.

Таким образом, геометрическое нивелирование можно использовать для определения вертикальных смещений на участках со значительными углами наклона. Опыт работы показал, что при этом может быть достигнута высокая производительность полевых работ. Так, на нивелирование участка превышением 120—150 м затрачивалось в среднем 4 ч. При отсутствии кустарника и ровной поверхности склона нивелирование можно выполнять быстрее.

№ узловой точки по рисунку	$m$ , мм	№ узловой точки по рисунку	$m$ , мм
121	6,8	318	24,1
620	12,5	314	20,4
120	6,4	311	18,8
617	10,7	410	19,7
119	9,8	511	19,7
118	11,0	501	8,2
615	10,6	401	5,9
614	12,5	301	6,2
КП1	11,8	601	3,2
116	19,5	102	4,4

При наблюдениях по профильным линиям превышения между реперами, полученные при геометрическом нивелировании, могут использоваться для редуцирования на горизонтальную плоскость наклонных расстояний между этими реперами. Это исключает необходимость измерения вертикальных углов и упрощает процесс измерения длин интервалов.

При значительных превышениях горизонтальные проложения удобно вычислять по формуле

$$l = \sqrt{L^2 - H^2}, \quad (4)$$

где  $L$  — измеренное наклонное расстояние;  $H = h_2 + \Delta h$  — приведенное превышение, т. е. превышение между целиками штативов при измерении длин;  $h_2$  — превышение между реперами по данным нивелирования;  $\Delta h$  — разность высот штативов при измерении длин.

Продифференцировав формулу (4), получим ошибку определения горизонтального проложения:

$$m_l^2 = \frac{L^2 m_L^2 + H^2 m_H^2}{L^2 - H^2}. \quad (5)$$

где  $m_L$  и  $m_H$  — соответственно ошибки измерения длин и определения приведенного превышения.

В свою очередь, ошибка  $m_H$  складывается из ошибок геометрического нивелирования и ошибок измерения высот штативов  $m_v$ :

$$m_H^2 = n m_h^2 + 2 m_v^2, \quad (6)$$

где  $n$  — число штативов в ходе между реперами, которое зависящее от величины превышения и формы хода;  $m_h$  — ошибка определения превышения на одной станции.

Подставив в формулу (5) значения  $m_H$  из выражения (6) и обозначив  $H/L$  через  $\sin \delta$  угла наклона линии, получим

$$m_l = \frac{m_L^2 + (n m_h^2 + 2 m_v^2) \sin^2 \delta}{\cos^2 \delta}. \quad (7)$$

Из полученной формулы видно, что ошибка определения горизонтального проложения возрастает с увеличением угла наклона. При этом так же возрастает влияние ошибок приведенного превышения. Поэтому следует обращать особое внимание на точность определения высот штативов. Измерение длин рулетками необходимо производить либо по жестким отвесам, либо непосредственно между реперами.

Для решения вопроса о возможности применения данных геометрического нивелирования для приведения длин на горизонтальную плоскость необходимо выполнить предрасчет по формуле (7).

В табл. 3 произведен предрасчет погрешности определения положения в горизонтальной плоскости  $M_L$  для наиболее удаленных реперов нагорной части рассматриваемой станции. Вычисления выполнены относительно опорных реперов профильных линий при условии, что длины измерялись рулетками по жестким отвесам  $m_v = 1$  мм).

Таблица 3

№ линии по рисунку	Наклонное расстояние от опорного репера $L$ , м	Количество интервалов	Средняя длина интервала, м	Превышение относительно опорного репера, м	Угол наклона интервала, °			Ошибка планового положения удаленного репера	
					максимальный	минимальный	средний	$M_L$	$\frac{M_L}{L}$
1	263,1	15	17,5	142,9	39	26	33	19,8	1 : 13 300
3	308,0	18	17,1	147,4	36	23	29	19,9	1 : 15 500
4	295,9	17	17,4	149,4	34	26	30	19,8	1 : 14 900
5	239,4	13	18,4	120,0	33	26	30	17,6	1 : 13 600
6	254,7	13	19,6	122,4	36	21	29	17,6	1 : 14 500

По всем линиям относительные ошибки не превышают 1 : 10000, что отвечает требованиям, предъявляемым к наблюдениям за деформациями бортов карьеров.

На основании проведенных работ можно сделать следующие выводы.

Геометрическое нивелирование мало зависит от сложных метеорологических условий горной местности и может применяться для высокоточного определения вертикальных смещений при углах наклона до 30—35°.

Нивелирование следует выполнять нивелирами с компенсаторами и применять рейки с инварными полосами. Нивелирование профильных линий следует производить в одном направлении, соединяя между собой отдельные линии. Желательно во всех сериях наблюдений измерения производить по одной и той же схеме, что значительно упрощает оценку точности наблюдений.

По превышениям, определенным из геометрического нивелирования, можно редуцировать на горизонтальную плоскость наклонные расстояния между реперами профильных линий.

## Список литературы

1. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л., ВНИМИ, 1971. 186 с. с ил.