

В. А. САЖИН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕФРАКЦИОННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ НОЧЬЮ И ДНЕМ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В связи с переходом в стране к большим объемам крупномасштабных топографических съемок, актуальной задачей является создание плановой и высотной основы этих съемок в сжатые сроки и с надлежащей точностью. Создание высотной основы связано с большим объемом нивелирных работ, что в горных условиях сопряжено со значительными затратами материально-технических средств при малой производительности труда. Создание высотной основы в горных районах методом геодезического нивелирования, соответствующего по точности геометрическому нивелированию, дало бы значительный экономический эффект.

Вопросам геодезического нивелирования в горах посвящен ряд работ [1, 2, 3, 4, 5], из которых большинство исследуют точность геодези-

ческого нивелирования днем. Только в [4] в какой-то степени авторы касаются геодезического нивелирования ночью. На наш взгляд, имеет смысл детальное исследование точности геодезического нивелирования именно в ночное время, когда уменьшается динамическая и термическая турбулентность, то есть когда атмосфера значительно стабилизируется. Поэтому ночью следует ожидать определенного постоянства коэффициента рефракции и повышения точности геодезического нивелирования. К сказанному можно добавить, что так как светодально-

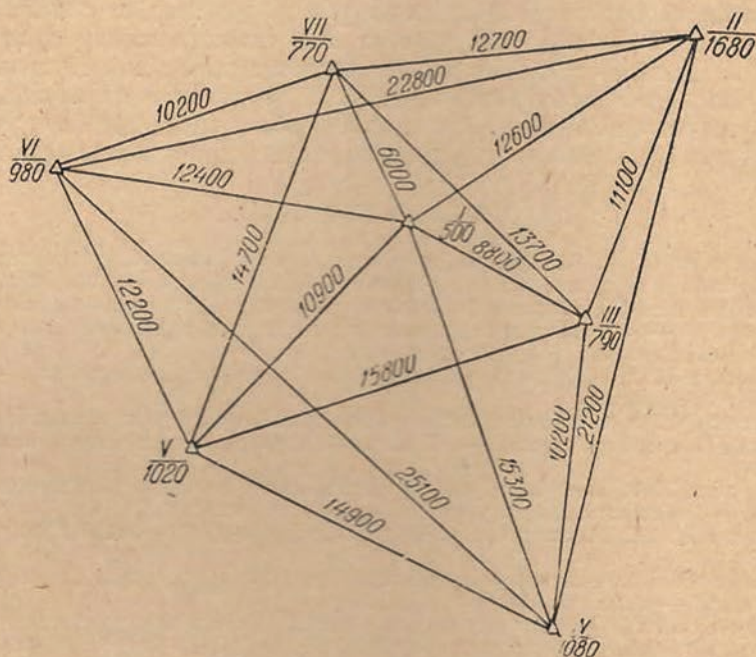


Рис. 1. Схема эталонного геодезического полигона в горном районе Карпат.

мерные измерения часто выполняются ночью, то производство одновременно с ними геодезического нивелирования было бы весьма целесообразным.

Настоящие исследования проводились на эталонном геодезическом полигоне в горном районе Карпат, созданном научно-исследовательской лабораторией при Львовском политехническом институте по заданию ЦНИИГАиК в 1968—1970 годах [1].

В июне 1973 г. в течение шести дней на пункте I были проведены круглосуточные измерения зенитных расстояний по направлениям I—III, I—V, I—VI, I—VII (рис. 1).

При измерениях зенитных расстояний средняя нить сетки нитей теодолита ОТ-02 наводилась методом касания на верхний срез визирного цилиндра (дневное время), а в ночное (с 22 час до 5 час) — на светящиеся цели (люкасы и фонари). Измерения велись со штатива ежедневно тремя приемами. Отсчеты брались только при искусственном освещении шкалы окулярного микрометра.

Одновременно с измерением зенитных расстояний в начале и конце каждой часовой серии на всех пунктах выполнялись наблюдения основных метеоэлементов: температуры, давления, силы ветра. Погодные условия и колебания изображений фиксировались по пятибалльной системе.

Лабораторные исследования инструментов показали, что они удовлетворяют требованиям действующих инструкций. Кроме этого, проведены исследования ошибок делений вертикального круга теодолита на специальной установке в ЦНИИГАиК. В результате этих исследований установлено, что в интервале $84-96^\circ$ ошибки делений лимба вертикального круга достигают $3''{,}5$. Наряду с этим, по известной методике была определена толщина горизонтальной нити теодолита. Она оказалась равной $2''{,}5$. Указанные поправки введены в зенитные расстояния, измеренные днем. Зенитные расстояния, полученные из ночных наблюдений, исправлены только поправками за ошибки делений вертикального круга инструмента.

При обработке экспериментальных данных были вычислены теоретические зенитные расстояния [1]:

$$\operatorname{ctg} \cdot z_T = \frac{H_2 - H_1}{S \left(1 + \frac{H_2}{R}\right)} - \frac{S}{2(R + H_2)} + \frac{\xi_2 - \xi_1}{S \left(1 + \frac{H_2}{R}\right)} - \frac{U_1}{1 + \frac{H_2}{R}}, \quad (1)$$

где

$$\xi_2 - \xi_1 = U_m S - \Delta E, \quad (2) \quad U_m = \frac{1}{S} \int_0^S U dS, \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{1}{\gamma_m} \Delta g_m h_{1,2} - \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_{0,2} - \gamma_{0,1}) H_m, \quad (4)$$

$$\gamma_m = (\gamma_0)^{\varphi_m} - 0,15 H_m, \quad (5) \quad H_m = \frac{H_1 + H_2}{2}. \quad (6)$$

Обозначения те же, что в работе [1].

Используя теоретические z_T и измеренные z_1 зенитные расстояния, были найдены коэффициенты рефракции

$$k = \frac{2R}{\rho'' S} \delta z, \quad (7)$$

где

$$\delta z = z_T - z_1. \quad (8)$$

Всего было вычислено 1728 значений коэффициентов рефракции, которые сгруппированы по каждому направлению на каждый час суток. По средним величинам k , полученным из 18 приемов, составлен график суточного хода коэффициента рефракции (рис. 2).

На графике видно, что величина коэффициента по всем направлениям для ночного периода наблюдения имеет меньшую амплитуду колебаний, чем днем. Дневной ход коэффициента рефракции по направлениям I—III, I—V, I—VI сложен в интервале времени с 10 до 21 часа.

Для определения моментов времени, в которых величина коэффициента наиболее стабильна, результаты наблюдений разделены на два периода: ночной и дневной. Дневной период рассмотрен в трех интервалах времени: с 6 до 21 часа (все светлое время суток); с 8^h до 19^h (период, рекомендуемый инструкцией) и с 10 до 21 часа. Данные табл. 1, где в скобках указано число приемов, по которым вычислено среднее значение k и его средняя квадратическая ошибка m_k , показывают, что наиболее устойчивые коэффициенты рефракции для одного и того же направления наблюдаются ночью. Изменение коэффициента ночью не превышает 0,020, в то время как днем — 0,040. Наиболее благоприятным дневным периодом наблюдения зенитных расстояний является промежуток времени с 10 до 21 часа. В это время максимальное изменение коэффициента рефракции не превышает 0,021.

Для выяснения зависимости между коэффициентами различных направлений, в табл. 2 даны средние значения коэффициента на каждый час суток (по четырем направлениям) для ночного и дневного периодов и средняя квадратическая ошибка определения коэффициента (получена из 72 значений).

Как показывают данные этой таблицы, максимальные изменения коэффициента рефракции от направления к направлению ночью равны

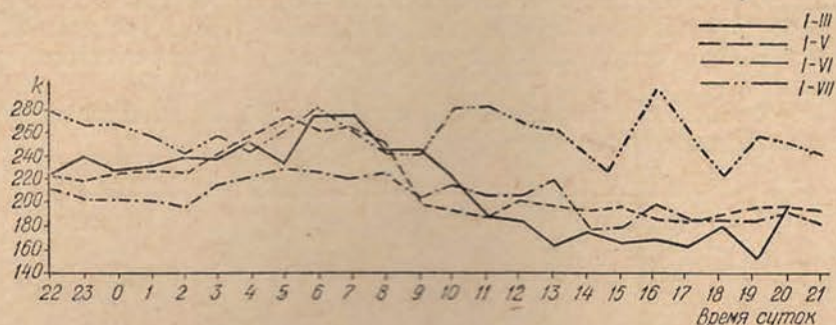


Рис. 2. Суточный ход коэффициента рефракции.

0,033, днем — 0,063. При этом изменения $k_{\text{ср}}$ различных направлений во времени для ночного периода меньше, чем днем.

Наряду с этим, для анализа точности тригонометрического нивелирования ночью использованы экспериментальные наблюдения, выполненные с участием автора в 1968—1969 гг. при создании эталонного геодезического полигона. Программа полевых экспериментальных работ была построена таким образом, что одновременно с измерением длин сторон геодезическим прибором NAS M-2A велись взаимные одновременные измерения зенитных расстояний по каждой линии. Визирными целями служил свет приемопередатчика и отражателя. Наблюдения по каждой линии проводились в течение одной-двух ночей. Так как измерения велись в течение двух сезонов, то линия III—I являлась контрольной и по этому направлению выполнен более значительный объем измерений зенитных расстояний.

Таблица 1

Изменение рефракции во времени для одного и того же направления

Линии направлений	Ночной период		Дневной период					
	22 ^h —5 ^h (144)		6 ^h —21 ^h (288)		8 ^h —19 ^h (216)		10 ^h —21 ^h (216)	
	$k_{\text{ср}}$	m_k	$k_{\text{ср}}$	m_k	$k_{\text{ср}}$	m_k	$k_{\text{ср}}$	m_k
I—III	0,238	±0,008	0,205	±0,040	0,192	±0,032	0,186	±0,020
I—V	0,242	±0,020	0,208	±0,028	0,200	±0,018	0,195	±0,006
I—VI	0,207	±0,014	0,204	±0,019	0,201	±0,017	0,197	±0,015
I—VII	0,261	±0,015	0,264	±0,022	0,264	±0,024	0,265	±0,021

Используя результаты этих экспериментальных наблюдений, было вычислено около 2200 коэффициентов рефракции. В последующем из материала экспериментальных данных была выделена та часть измерений зенитных расстояний, которые велись с сигналами. При этом значения вычисленных коэффициентов оказались близки к стандартному (в нашем случае $k=0,13$).

Зависимость между коэффициентами различных направлений

Время	22 ^h	23 ^h	0 ^h	1 ^h	2 ^h	3 ^h	4 ^h	5 ^h	Н О Ч Ь
$k_{ср}$ m_k	0,235 0,033	0,233 0,029	0,232 0,028	0,232 0,024	0,226 0,023	0,239 0,022	0,246 0,021	0,255 0,022	
Время	6 ^h	7 ^h	8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	Д Е Н Ь
$k_{ср}$ m_k	0,266 0,023	0,259 0,022	0,243 0,010	0,225 0,026	0,230 0,036	0,218 0,043	0,216 0,034	0,215 0,043	
Время	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h	20 ^h	21 ^h	
$k_{ср}$ m_k	0,201 0,031	0,205 0,042	0,220 0,063	0,200 0,045	0,195 0,018	0,202 0,046	0,218 0,033	0,210 0,025	

Вычисление превышений и оценка точности для одностороннего геодезического нивелирования выполнены по формулам

$$h_{1,2} = S \operatorname{ctg} z_{1,2} + \frac{H_m + N_m}{R} S \operatorname{ctg} z_{1,2} + \frac{1 - k_{1,2}}{2R \sin^2 z_{1,2}} S^2 + (U_1 - U_m) \frac{S}{\rho'' \sin^2 z_{1,2}} + \Delta E + i_1 - i_2; \quad (9)$$

$$h_T = H_2 - H_1, \quad \Delta h = h_{1,2} - h_T, \quad m_h = \pm \sqrt{\frac{[\Delta h]^2}{n}}, \quad (10)$$

где Δh — разности уклонов вычисленных превышений от превышений, определенных из нивелирования II класса.

Полученные величины показаны в табл. 3. В первой графе таблицы дана длина линии визирования и ее название.

По данным, которые представлены в табл. 3, видно, что при одностороннем геодезическом нивелировании ночью, выполняемом с сигналов, средняя квадратическая ошибка определения превышения равна $\pm 0,16$ м. Ошибки геометрического нивелирования IV класса и технического соответственно равны $\pm 0,10$ м, $\pm 0,24$ м. Сопоставляя эти величины, отметим, что одностороннее геодезическое нивелирование с сигналов, выполняемое ночью, может заменить техническое и по точности приближается к нивелированию IV класса. Отметим, что в горных районах при проведении геометрического нивелирования длина хода увеличивается в 2—3 раза и для наших условий равна 23 км, что и принято во внимание при вычислении допустимых погрешностей геометрического нивелирования. При этом поправки за ошибки делений лимба вертикального круга теодолитов не введены в результаты измерений зенитных расстояний из-за отсутствия в настоящее время применяющихся инструментов.

На основании выполненных в горных условиях исследований можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее благоприятным дневным периодом наблюдения зенитных расстояний является отрезок времени — 4 часа после восхода — один час до захода Солнца. В указанное время максимальные изменения k от направления к направлению не превышают 0,021.

Оценка точности одностороннего геодезического нивелирования ночью с сигналов

S, км	Дата	Δh	S, км	Дата	Δh	S, км	Дата	Δh
8,8 III-I	14-15.IX. 68	-0,22	8,8 III-I	26-27.V. 69	-0,02	8,8 III-I	30-31.V. 69	+0,04
	24-25.V. 69	-0,16		28-29.V. 69	+0,10	—	—	—
	25-26.V. 69	+0,08		29-30.V. 69	+0,09	10,2 III-IV	11-12.X. 69	+0,34
10,9 V-I	21-22.V. 69	+0,04	11,1 II-III	24-25.IX. 69	-0,31	12,6 II-I	16-17.VII.69	+0,09
	23-24.V. 69	-0,01	—	—	—	—	29.VII. 69	-0,03
12,7 II-VII	1-2.VIII. 69	-0,20	13,7 III-VII	30.IX. 68	+0,17	13,7 III-VII	6.X. 68	+0,17
	—	—		1.X. 68	-0,03		6-7.X. 68	-0,13
14,7 V-VII	8-9.VII. 69	-0,22	14,7 V-VII	12.IX. 69	-0,24	14,9 V-IV	7-8.X. 69	+0,17

$m_h = \pm 0,16$ м,
 $S_{ср} = 11,5$ км,

$m_{h IV кл} = \pm 0,10$ м,
 $m_{h техн} = \pm 0,24$ м.

2. Устойчивые коэффициенты вертикальной рефракции во времени для одного и того же направления наблюдаются ночью. Изменение коэффициента ночью не превышает 0,020.

3. Максимальные изменения коэффициента рефракции от направления к направлению ночью равны 0,033, а днем — 0,063.

4. Одностороннее геодезическое нивелирование с сигналов, выполняемое ночью, может заменить техническое нивелирование и по точности приближается к геометрическому нивелированию IV класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вировец Ю. Б., Наумов Я. В., Островский А. Л. Эталонный геодезический полигон в горном районе. — «Геодезия и картография», 1971, № 12.
2. Изотов А. А. и Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.
3. Маслич Д. И. О точности геодезического нивелирования в горных условиях. Львов, 1957.
4. Bauernfeind C. Ergebnisse aus Beobachtungen der terrestrischen Refraction. Zweite Mitteilung. Abhandlungen der Mathematisch — physikalischen Classe der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. München, 1883.
5. Hradilek L. Bestimmung der relativen Lotabweichungen und des Refraktionskoeffizienten beim Ausgleich trigonometrisch gemessener Höhenetze (Fortsetzung). Ceskoslovenska Akademie ved Studia Geophysica et Geodaetica 4 Rocnik 3. 1959.

Работа поступила 12 июня 1974 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.