

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА УЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ В ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

Невысокая точность тригонометрического нивелирования в основном обусловлена действием вертикальной рефракции. Метеорологические методы ее учета приводят к ограниченному повышению точности определения высот пунктов, так как результаты измерений метеопараметров на одной вертикали не соответствуют фактическому плотностному строению атмосферы вдоль трассы. Для точного вычисления рефракции необходимо определять параметры метеорологического поля во множестве точек на пути визирного луча, что практически невыполнимо. Тем не менее попытки получить формулы для учета вертикальной рефракции на основе знания метеофакторов в некоторой точке продолжаются. Например, в [3] предлагаются следующие формулы для вычисления поправки за рефракцию в тригонометрическом нивелировании:

$$r = -0,5S^2 \left(0,0342 - \frac{\gamma_1}{z} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta T_2}{2,3 \lg \frac{200}{z_0'}}; \quad (2)$$

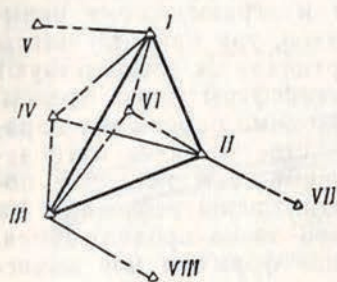
$$\Delta T_2 = T_0 - T_2, \quad (3)$$

где S — длина визирной линии; γ_1 — градиент температуры воздуха на высоте 1 м, определенный по методу А. Р. Константинова [2]; \bar{z} — репрезентативная высота (близкая к эквивалентной); z_0' — видоизмененный коэффициент шероховатости; ΔT_2 — разность температур воздуха на высоте 2 м и на уровне шероховатости подстилающей поверхности. Практически (1) — это видоизмененная формула Иордана [1], записанная при условии, что вертикальный градиент температуры γ_1 обратно пропорционален репрезентативной высоте \bar{z} . Вычисляемая по (1) r вводится в формулу одностороннего тригонометрического нивелирования, принимающую такой вид без учета поправок за отклонение отвесной линии

$$h = S \operatorname{ctg} z + i - v + \frac{S^2}{2R} + r. \quad (4)$$

Возможности вышеназванного метода проверены по результатам тригонометрического нивелирования в холмистом районе УССР. Наблюдения велись в течение 14 дней августа 1980 г. в сети триангуляции III—IV классов с длинами линий от 2,7 до 7,1 км и эквивалентными высотами от 6 до 65 м. Отметки всех пунктов определены геометрическим нивелированием II класса. Зенитные

расстояния и метеофакторы измеряли одновременно на трех пунктах I, II, III, образующих замкнутую фигуру (рис. 1). Измерения производили с каждого пункта по четным часам в течение всего светлого периода суток по пяти направлениям, причем направления I—II, II—III, III—I — взаимные. Теодолиты ОТ-02 на пунктах I и II устанавливали на металлических штативах, на пункте III — на сигнале с высотой столика 8,5 м. Для каждой линии после вычисления поправок за рефракцию по (1), (2), (3)



значения исправленных превышений сравнивали с превышениями из геометрического нивелирования. Разности превышений можно считать истинными ошибками и использовать для оценки точности полученных превышений по отдельным линиям, на пункте и в сети пунктов. Поправки за рефракцию вычислены для периода 10—18 ч, т. е.

Рис. 1. Схема сети.

при нормальной стратификации температуры с высотой, так как при инверсионном распределении температуры метод, как указано в [3], неприменим.

Таблица 1. Оценка точности определения превышений метеорологическим методом

Линия	Длина линии, S	Эквивал. высота, h_9	Число измерений, n	Средняя кв. ошибка по линии m_L см	Средняя кв. ошибка на пункте m_I см	Средняя кв. ошибка в сети M, см
I — II	— III	4,4	17	53	12,9	10,3
	— VI	7,1	43	56	11,5	
	— IV	2,7	14	62	9,1	
	— V	4,3	41	62	8,7	
	— V	3,5	30	62	10,0	
II — III	— I	5,5	30	42	11,9	12,9
	— IV	4,4	7	37	18,1	
	— VI	4,7	26	42	10,6	
	— VII	2,9	6	40	17,7	
	— VII	3,6	32	42	7,2	
III — I	— II	7,1	60	27	16,4	12,2
	— IV	5,4	64	26	11,2	
	— VI	3,2	50	25	10,5	
	— VIII	4,5	65	26	12,1	
	— VIII	4,2	60	25	10,6	

Характеристика сети и оценка точности превышений приведены в табл. 1, результаты в которой показывают, что средняя квадратическая ошибка M определения превышения в сети, полученная по 627 разностям исправленных и истинных превышений, составляет 11,9 см, что соответствует точности технического нивелиро-

вания. Наилучшие результаты получены в периоды устойчивой солнечной погоды. Для четырех дней такой погоды на пункте I m_i для пяти линий, полученная по 136 разностям, составляет 8,1 см, а для линии I—V за те же четыре дня m_h — 6,5 см по 35 разностям.

Для всего периода наблюдений наименьшие m_h соответствуют сравнительно коротким (3—4 км) линиям с достаточно большими эквивалентными высотами (линии I—IV, II—VII). Наиболее низ-



Рис. 2. Дневное изменение средней квадратической ошибки определения превышений по линии I—IV и ход вертикального градиента температуры на пункте I.

---- m_h ; — γ

кая точность определения превышений получена для линий с малыми эквивалентными высотами (линии II—I, II—VI). Здесь m_h составляет $\pm 18,1$ см, а отдельные разности исправленных и истинных превышений равны 32—35 см. На рис. 2 представлено дневное изменение средней квадратической ошибки m_h определения превышения для линии I—IV, длина которой примерно соответствует средней длине сторон в наблюдаемой сети. Вычисления выполнены для первой недели наблюдений при устойчивой солнечной погоде. Кроме того, на рис. 2 представлен осредненный за те же семь дней ход вертикального градиента температуры γ град/м. Как видим, в период температурной инверсии (20—21 ч) метеорологический метод непригоден для учета вертикальной рефракции — ошибки весьма значительны. Наименьшие значения ошибок — периоды, совпадающие или близкие к моментам спокойных изображений. Как уже указывалось, зенитные расстояния на пунктах I, II, III измеряли в течение дневного периода одновременно. На превышение, вычисленное на основании взаимных одновременных измерений зенитных расстояний, действие рефракции почти не сказывается (в случае незначительной разности взаимных эквивалентных высот лучей). Поэтому представляет интерес сравнение оценки точности превышений, полученных как среднее из одновременного двухстороннего нивелирования без введения поправки за рефракцию; превышений из одностороннего нивелирования без и с введением поправки за рефракцию метеорологическим методом, и превышений из двухстороннего тригонометрического нивелирования с введенными поправками за ре-

фракцию. В табл. 2 в качестве примера даны средние квадратические ошибки определения превышений четырьмя вышеназванными методами за весь период наблюдений для линии I—II. Так как наблюдения проведены на обеих конечных точках линии, то в табл. 2 результаты одностороннего тригонометрического нивелирования

Таблица 2. Оценка точности определения превышений различными методами по линии I—II

Метод	Время							
	9	10	12	14	16	18	19	20
Одностороннее нивелирование без поправки r	18,6	16,2	15,9	14,3	11,5	27,7	34,9	77,4
	09,4	17,3	21,0	12,7	18,1	29,7	52,1	110,9
Одностороннее нивелирование с поправкой r	12,7	13,8	14,2	08,9	13,5	15,8	20,6	56,6
	30,5	14,1	21,3	18,8	12,5	15,2	22,7	85,1
Одновременное двухстороннее нивелирование	7,2	3,6	6,7	8,4	5,9	4,6	10,5	21,5
Двухстороннее нивелирование с поправкой r	10,5	10,5	8,7	7,2	6,6	4,4	10,1	24,2

лирования без поправки за рефракцию и с введенной метеорологической поправкой r занимают две строчки: верхняя получена по результатам наблюдений с пункта I, нижняя — по результатам с пункта II. Как видим из табл. 2, наиболее точен метод одновременного двухстороннего нивелирования. В течение дня для линии длиной 4,4 км одновременное двухстороннее нивелирование без введения поправок за рефракцию в два раза точнее одностороннего тригонометрического нивелирования с введением метеорологической поправки за рефракцию. Введение метеорологических поправок в результаты одновременного двухстороннего нивелирования снизило точность определения превышений на 20%. Данные табл. 2 еще раз подтверждают, что в периоды инверсии температуры (20 ч) выполнение тригонометрического нивелирования с учетом рефракции метеорологическим методом невозможно.

В заключение отметим, что примененный метеорологический метод учета вертикальной рефракции в период с 10 до 19 ч дня позволяет улучшить результаты определения превышений в одностороннем тригонометрическом нивелировании. Однако этот метод нельзя считать эффективным, так как результаты одновременных взаимных наблюдений без введения поправок за рефракцию в два раза точнее, чем результаты с применением метеорологического метода.

Список литературы: 1. *Изотов А. А., Пеллинен Л. П.* Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — Тр. ЦНИИГАиК, 1955, вып. 102. *Константинов А. Р.* Испарение в природе. — Л.: Гидрометеониздат, 1968. 3. *Мозжухин О. А.* Определение коэффициента рефракции способом метеорологических измерений. — Геодезия и картография, 1976, № 12.

Статья поступила в редколлегию 17.11.82
