

ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ

С внедрением в производство свето- и радиодальномеров создание плановой опорной сети значительно облегчается. Однако по-прежнему трудоемкой частью является создание высотной опорной сети. Достижения в создании высокоточных оптических теодолитов и в изучении особенностей приземного слоя воздуха позволяют по-новому подойти к использованию геодезического нивелирования. В последние годы этот вопрос находит освещение в ряде исследований, проведенных как у нас, так и за границей, в основном в равнинных и высокогорных районах [1, 2, 6].

Для выявления точности определения высот пунктов триангуляции разными методами геодезического нивелирования, в зависимости от характера местности и метеорологических условий, влияния вертикальной рефракции и определения наилучшей методики работ, автором были выполнены специальные полевые наблюдения в трех районах. Наиболее продолжительные наблюдения проведены в горном районе Карпат (Долина—Выгода) в течение ноября 1953 г., января и апреля 1954 г. и июля 1955 года. В сентябре 1954 проведены наблюдения в условиях холмистой местности (г. Берегово, Закарпатской обл.). Наблюдения над водной поверхностью значительного протяжения ставились на Азовском море (лиман Молочный) в июле 1960 года.

Характеристика условий местности и краткий анализ исследований, выполненных в этих районах, приводятся в работах [3, 4, 5].

Методика проведения всех наблюдений была примерно одинаковой. Основную часть составили одновременные измерения зенитных расстояний двумя-четырьмя приемами с двух или трех пунктов триангуляции, с интервалами в 1 час или полчаса, в продолжение всего светлого времени суток. Наряду с этим проводилось также двухстороннее и одностороннее измерение зенитных расстояний. Расстояния между пунктами (в пределах от 3 до 8 км) были точно известны и, кро-

ме того, из геометрического нивелирования точно определялись их высоты. Попутно с измерениями зенитных расстояний на каждом пункте измерялись по определенной программе основные метеорологические элементы: температура, вертикальный температурный градиент, давление, влажность, облачность, направление и скорость ветра. Продолжительность наблюдений была различной: в первом районе четыре месяца, во втором — неделя, а в третьем — несколько дней.

Измерение зенитных расстояний проводилось большими и средними оптическими теодолитами, которые предварительно тщательно исследовались. Высоты знаков и инструментов измерялись компарированной рулеткой и определялись аналитически.

При анализе результатов наблюдений материал одновременного измерения зенитных расстояний использовался там же, как односторонние и двухсторонние измерения зенитных расстояний, что позволило сделать сравнительную оценку этим методам геодезического нивелирования.

Для вычисления величины влияния рефракции и коэффициента рефракции определялись так называемые теоретические зенитные расстояния, которые получились бы при измерениях, если бы отсутствовало влияние рефракции. Такие вычисления проводились по следующим формулам:

$$\operatorname{ctg} z_1^0 = \frac{(H_2 - H_1) - i_1 + v_2 - (u_1 - u_m) \cdot s - E}{s \left(1 + \frac{H_2}{R} \right)} - \frac{s}{2R \left(1 + \frac{H_2}{R} \right)}, \quad (1)$$

$$\delta z = z_1^0 - z_1, \quad (2)$$

$$k = \frac{2R}{\rho'' s} \delta z, \quad (3)$$

где H — высота точки, полученная из геометрического нивелирования; s — проекция линии нивелирования на эллипсоид; z — измеренное зенитное расстояние; z^0 — теоретическое зенитное расстояние; R — радиус кривизны нормального сечения эллипсоида вдоль линии нивелирования; u — компонент уклонения отвеса вдоль линии нивелирования; u_m — среднее интегральное уклонение отвеса вдоль линии нивелирования; E — поправка за непараллельность уровней поверхностей; κ — коэффициент рефракции; δz — поправка за рефракцию; i — высота инструмента; v — высота визирной цели. (В этих формулах, как и в дальнейшем, индексом 1 отмечены величины, относящиеся к начальному пункту нивелирования, индексом 2 — величины, относящиеся к конечному пункту).

Члены $(u_1 - u_m) \cdot s$ и E , учитывающие отклонение отвесных линий от нормалей к эллипсоиду и непараллельность уровен-

ных поверхностей для горного и холмистого районов, вычислялись способами, которые изложены в работах [2 и 3]. Для района лимана Молочного эти величины не вычислялись.

Для того чтобы судить о дневной изменчивости влияния рефракции, можно использовать величины δz или k . Более удобно использовать для этой цели величину k , так как она не зависит от длин линий. Ввиду обширности материала из

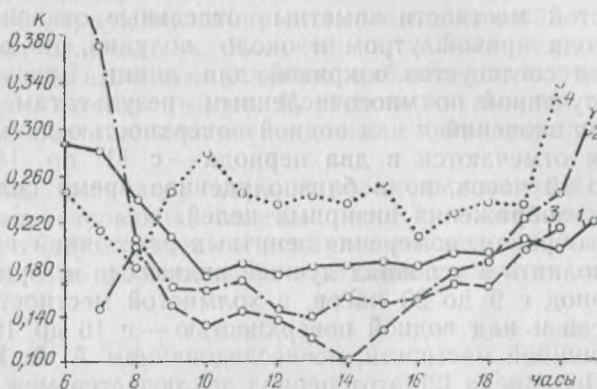


График изменения величины k в зависимости от условий местности.

1 — для горного района (без линии Брочков—Долина); 2 — для линии Брочков—Долина; 3 — для холмистой местности; 4 — для водной поверхности значительного протяжения.

всех наблюдений были вычислены средние значения k для каждого часа, которые приводятся на графике (см. рис.). Для района Долины взяты только летние наблюдения, при этом средние значения k по линии Брочков—Долина выделены отдельно, так как средняя высота луча над подстилающей поверхностью для этой линии составляет около 27 м, что характерно для холмистой местности (по остальным линиям этого района средняя высота визирного луча колеблется в диапазоне от 130 до 220 м).

Как видно из графика, общий ход кривой изменчивости k имеет примерно одинаковый характер: с утра наблюдаются максимальные значения k , затем они уменьшаются примерно до близполуденных часов, а к закату Солнца снова увеличиваются. Такой же характер изменения k наблюдается и в равнинных районах [2]. Следует отметить своеобразный характер изменения k над водной поверхностью, что объясняется наличием здесь особого температурного режима.

Для дневной кривой k в горном районе заметно смещение ее экстремума по направлению к вечерним часам. Подобный

вывод статистически получен по результатам геодезического нивелирования в Индии [1].

Как видно из графика, величина k практически остается неизменной в интервале от 9 до 20 часов в горном районе, незначительно изменяется в промежутке от 9 до 19 часов в холмистой местности и мало меняется от 11 до 19 часов над водной поверхностью.

Наименее изменчиво значение k в горной местности. В холмистой местности заметны отдельные отклонения от общего хода кривой утром и около полудня, но в общем эта кривая согласуется с кривой для линии Брочков—Долина, полученной по многочисленным результатам наблюдений. Для значений k над водной поверхностью наименьшие колебания отмечаются в два периода—с 11 по 14 часов и с 16 по 19 часов, но в близполуденное время сильно колеблются изображения визирных целей.

Таким образом, измерение зенитных расстояний выгоднее всего выполнять в условиях лучшей видимости в горном районе в период с 9 до 20 часов, в холмистой местности—с 9 до 19 часов и над водной поверхностью—с 16 до 19 часов.

В равнинной местности, по исследованиям А. А. Изотова и Л. П. Пеллиненa [2], этот период заключается между 8—9 и 17 часами.

Для выявления зависимости коэффициента вертикальной рефракции от метеорологических элементов можно использовать известную формулу Иордана:

$$x = 0,2325 \frac{B}{760(1+at)^2} \{1 - 29,39\tau\}, \quad (4)$$

где x —коэффициент вертикальной рефракции для дифференциально малого отрезка световой кривой; B —давление воздуха в мм; t —температура в градусах Цельсия; $\tau = -\frac{dT}{dh} = \gamma$ —вертикальный градиент температуры в град/м.

Анализ этой формулы показывает, что наибольшее влияние на коэффициент рефракции оказывает вертикальный температурный градиент.

Вычисление значений x для горного района по измеренным значениям $\frac{dT}{dh}$, B и t , которые приводятся в работе [3], показали, что величины x имеют такой же дневной ход, что и k , но по своей величине систематически меньше, чем значения k . Аналогичное явление наблюдалось в Альпах в долине Изара [7].

Примерно такие же результаты получаются для значений x и в холмистой местности. Что же касается условий над лиманом, то здесь наложение на температурное поле водной

поверхности температурного поля суши приводит к тому, что дневная температурная кривая имеет два минимума и два максимума. Это объясняется тем, что над сушей летом суточная температурная кривая имеет одну точку максимума после полудня и один минимум в ранние утренние часы. Над водным бассейном максимум температуры наступает около 3—4 часов дня, а минимум — через 2—3 часа после восхода Солнца. Самые большие изменения температурное поле претерпевает в первую половину дня, что подтверждается и вычислениями величины α . Полученные данные подтверждают вывод о менее выгодных условиях наблюдения в первую половину дня, чем во вторую. К такому же выводу приходит Н. А. Соколов в своем исследовании нивелирования через реку.

Переходя к анализу точности различных методов геодезического нивелирования, отметим, что превышения из одновременного двухстороннего и двухстороннего нивелирования вычислялись по формулам, учитывающим влияние всех факторов:

$$h = H_2 - H_1 = s \left(1 + \frac{H_1 + H_2}{2R} \right) \operatorname{tg} \frac{z_2 - z_1}{2} + \frac{\sin^2 z_2 \kappa_2 - \sin^2 z_1 \cdot \kappa_1}{4R} s^2 + \\ + \frac{H_2 - H_1}{12R^2} s^2 + \left(\frac{u_1 + u_2}{2} - u_m \right) s + E + \frac{H_2 - H_1}{2R} (\xi_1 + \xi_2) + \\ + \frac{i_1 + v_1}{2} - \frac{i_2 + v_2}{2}, \quad (5)$$

где ξ — высота квазигеоида, остальные обозначения прежние.

При вычислениях принималось $\kappa_1 = \kappa_2$. Для района Закарпатья и лимана Молочного при вычислениях h по формуле (5) использовались первый и два последних члена. Остальные члены по своей величине были незначительными и в расчет принимались только для горного района.

Для определения точности различных методов нивелирования превышения, вычисленные по формуле (5), сравнивались с превышениями, полученными из геометрического нивелирования.

Результаты проведенных подсчетов средней ошибки из одной серии приемов в зависимости от характера местности, метода нивелирования, длин линий и применяемого инструмента приводятся в таблице.

Из таблицы видно, что наибольшую точность можно получить при одновременном двухстороннем нивелировании, причем эта точность не уступает точности геометрического нивелирования IV класса при всех условиях.

Особого внимания заслуживает передача отметок методом одновременного геодезического нивелирования через водные

**Средняя ошибка в зависимости от характера местности,
метода нивелирования, длин линий**

Характер местности	Средняя длина линии	Применяемый инструмент	Средняя ошибка геодезического нивелирования		
			одностороннего	двухстороннего	одновременного двухстороннего
Горная	6,5 км	Большой оптический теодолит	0,15 м	0,08 м	0,05 м
"	8,0	"	0,21	0,11	0,06
"	6,5	Средний оптический теодолит	0,18	0,10	0,08
"	8,0	"	0,23	0,13	0,10
Холмистая	5,0	"	—	0,11	0,03
Водная поверхность:					
а) в течение дня	5,5	"	—	—	0,025
б) вторая половина дня	"	"	—	—	0,017

пространства значительного протяжения. Основная погрешность при этом виде нивелирования получается за счет величины:

$$\Delta h_k = \frac{\sin^2 z_2 \cdot \kappa_2 - \sin^2 z_1 \cdot \kappa_1}{4R} s^2 \quad (6)$$

Так как значения z близки к 90° , то для величины Δh_k можем записать:

$$\Delta h_k = \frac{\kappa_2 - \kappa_1}{4R} s^2. \quad (6')$$

Используя результаты одновременного измерения зенитных расстояний над водной поверхностью в районе лимана Молочного, по формулам (1), (2) и (3) были вычислены значения κ на обоих концах линии для одного момента времени. Затем по разностям $(\kappa_2 - \kappa_1)$ получили величины Δh_k , средние значения которого оказались для периода с 6 до 19 часов — 0,020 м, а для периода с 16 до 19 часов — 0,014 м. Максимальные погрешности, полученные в течение всего дня, со-

ставляли 0,064 м, а во вторую половину дня — 0,034 м. Эти данные показывают, что одновременное геодезическое нивелирование над водной поверхностью при значительной высоте визирного луча по своей точности может заменить геометрическое нивелирование III класса.

Точность двухстороннего нивелирования ниже, чем одновременного. В горной местности при длинах до 6 км разность $(\kappa_2 - \kappa_1)$ на концах линии не очень большая и над водной поверхностью сопоставима с точностью геометрического нивелирования IV класса. В холмистой местности она несколько ниже, чем в горной, что связано с увеличением разности $(\kappa_2 - \kappa_1)$.

При одностороннем нивелировании точность по сравнению с двухсторонним снижается в два раза.

ВЫВОДЫ

1. Дневное изменение коэффициента вертикальной рефракции представляет кривую, обращенную выпуклостью книзу. Наиболее резкие изменения наблюдаются утром и вечером. В остальное время, чем выше визирный луч над подстилающей поверхностью, тем меньше изменяется кривая. В горном районе заметно смещение ее экстремума по направлению к вечерним часам. Над водной поверхностью дневные изменения κ существенно отличаются от изменения их над сушей.

2. В летний период в горных условиях измерение зенитных расстояний выгоднее всего выполнять в условиях лучшей видимости в период с 9 до 20 часов, в холмистой местности — с 9 до 19 часов и над водной поверхностью — с 16 до 19 часов.

3. Вычисление вертикальных температурных градиентов и определение коэффициента вертикальной рефракции по измеренным метеорологическим элементам показывает, что при заранее известном характере изменения величин $\frac{dT}{dh}$ можно предвидеть характер влияния рефракции. Величины κ , вычисленные по формуле (4), имеют такой же дневной ход, как и значения κ , но по своей величине в горной и холмистой местности получаются меньше.

4. Над водной поверхностью лимана существуют особые метеорологические условия, вызванные наложением температурного поля суши на температурное поле над водой. Особенно сильные изменения температурное поле претерпевает в первую половину дня, которая вследствие этого не может быть благоприятной для измерения зенитных расстояний.

5. Произведенный расчет точности отдельных видов геодезического нивелирования показывает, что наиболее точные результаты дает одновременное нивелирование. В горной и холмистой местности оно может применяться вместо геометрического нивелирования IV класса. В горной местности при применении больших оптических теодолитов примерно такую же точность дает и двухстороннее нивелирование.

6. Одновременное геодезическое нивелирование над водной поверхностью значительного протяжения может заменить по точности геометрическое нивелирование III класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Бомфорд. Геодезия. Геодезиздат, М., 1958 (перевод с английского).

2. А. А. Изотов и Л. П. Пеллинен. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. Труды ЦНИИГАиК, вып. 102, М., Геодезиздат, 1955.

3. Д. И. Маслич. О точности геодезического нивелирования в горных условиях. Львов, 1957.

4. Д. И. Маслич. О применении одновременного геодезического нивелирования для определения высот пунктов триангуляции в холмистой местности. Труды Ворошиловского горнометаллургического института, т. I, Луганское обл. изд-во, 1960.

5. Д. И. Маслич. Опыт передачи высоты через значительное водное препятствие тригонометрическим нивелированием. «Геодезия и картография» № 9, М., 1963.

6. W. Hoffman. Studien zur trigonometrischen Höhenmessung in Gebirge. Abhandl. Bayer. Akad. Wiss. Math.-Naturwiss., kl. 1955, N 70.

Коммунарский
горнометаллический институт

Работа поступила
22 мая 1964 г.