

П. М. ШЕВЧУК

О ТОЧНОСТИ ОДНОСТОРОННЕГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО В ПЕРИОДЫ СПОКОЙНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ошибки геодезического нивелирования, связанные с неустойчивостью коэффициента рефракции во времени и в пространстве, вызваны изменениями градиентов температуры, которым в приземном слое воздуха присущи большие и быстрые колебания.

Как показано в [1], в периоды спокойных изображений при наличии ветра поле вертикального градиента температуры в приземном слое воздуха близко к однородному, а величины коэффициентов рефракции наиболее стабильны.

В эти периоды точность измерения зенитных расстояний не зависит от высоты прохождения визирного луча, длины линии, условий погоды, а остается постоянной и в 2—4 раза большей по сравнению с другими периодами.

В ясную тихую погоду эти периоды совпадают с моментами установления и разрушения температурной инверсии в приземном слое воздуха, то есть с началом периода спокойных изображений вечером и концом спокойных изображений утром [4].

Учитывая это, нами выполнены исследования точности одностороннего геодезического нивелирования при сгущении государственной геодезической сети пунктами 3 и 4 класса в равнинно-пересеченной местности.

Для этой цели были использованы зенитные расстояния, измеренные на 112 пунктах триангуляции IV класса в периоды спокойных изображений теодолитом ОТ-02 восемью приемами с точностью $\pm 1''5$.

Из общего количества пунктов 102 — простые металлические пирамиды, 9 — простые металлические сигналы высотой до 6 м и один простой сигнал высотой 12 м. Отметки всех пунктов определены из нивелирования III и IV классов.

Измерения зенитных расстояний выполнены в различных погодных условиях: на 54 пунктах при умеренном и сильном ветре, на остальных пунктах — в тихую погоду или при слабом ветре. В программу наблюдений включались наиболее короткие направления, имеющие лучшую видимость, как правило, по 3—4 на каждом пункте.

Колебания зенитных расстояний и места зенита, выведенные из отдельных приемов в 79,4%, не превышают 4" и в 96% не превышают 8".

Одновременно с измерением зенитных расстояний на каждом пункте измерялась температура и фиксировались условия погоды, видимость и сила ветра.

Высоты визирных цепей и инструмента измерялись стальной рулеткой с точностью порядка $\pm 0,5$ см.

Участок работ равнинно-пересеченный с глубокими балками и оврагами. Лучи визирования проходили над различными подстилающими поверхностями (пашня, луг, населенные пункты и др.). Средние высоты визирных лучей над поверхностью земли, как правило, колебались в пределах от 10 до 50 м и лишь в 15% случаев они были меньше 10 м.

Средняя длина стороны триангуляции 2,7 км, максимальная длина 6,1 км, минимальная — 1,4 км.

Вычисленный нами по данным геометрического нивелирования средний коэффициент рефракции для всего участка получен равным +0,132.

В исследованиях [2] величина среднего коэффициента рефракции для периода спокойных изображений получена равной +0,149. Поэтому в наших исследованиях для вычисления превышений из одностороннего геодезического нивелирования коэффициент рефракции для всего участка был принят +0,140, как среднее арифметическое из вышеприведенных двух значений.

Для определения точности одностороннего геодезического нивелирования по каждому направлению были вычислены прямые и обратные превышения и образованы разности превышений, полученных геодезическим и геометрическим нивелированием. При общем числе случаев 346 разности превышений распределены так:

Число случаев	$(h_{\text{геом}} - h_{\text{геод}}) \cdot \text{мм}$	%
267	0—55	77,2
67	56—110	19,4
6	111—165	1,7
6	Свыше 165	1,7

По полученным разностям подсчитана средняя квадратическая ошибка одностороннего превышения.

Средняя квадратическая ошибка разности превышений, состоящая из ошибок геометрического и геодезического нивелирования, вычислена по формуле

$$m_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_i^2]}{n}} = \pm 52 \text{ мм},$$

где Δ_i — разности превышений, определенных геометрическим и геодезическим нивелированием.

Принимая $m_{h_{\text{геом}}}$ для расстояний длиной 3 км, равной ± 20 мм, средняя квадратическая ошибка превышения из одностороннего геодезического нивелирования составит

$$m_h = \pm \sqrt{m_{\Delta}^2 - m_{h_{\text{геом}}}^2} = \pm 48 \text{ мм}.$$

Разности ($h_{\text{пр}} - h_{\text{обр}}$) вычисленных нами превышений в 88% случаев находятся в пределах от 0 до 100 мм (табл. 1).

Более грубые расхождения получены, как правило, по направлениям, эквивалентные высоты которых меньше 10 м.

Из анализа результатов вычислений видно, что при грубых расхождениях ($h_{\text{пр}} - h_{\text{обр}}$) среднее превышение не всегда является более точным. Истинная ошибка среднего превышения в ряде случаев значительно больше ошибки одного из односторонних превышений.

Качество измеренных превышений определялось также по невязкам замкнутых фигур и ходов между исходными пунктами. Невязки в ходах и замкнутых полигонах распределялись следующим образом:

Число случаев	Величина невязок, мм	%
84	0—50	75,0
22	51—100	19,6
6	101—150	5,4

Допустимые невязки вычислялись по формуле

$$w_h = \pm 0,048 \sqrt{n} \text{ м}.$$

Невязки в ходах и замкнутых полигонах длиной от 6 до 35 км в 96,5% случаев не превышали этого допуска, а в 71,8% случаев они равны его половине.

Следует отметить, что невязки замкнутых фигур являются надежными критериями точности одностороннего геодезического нивелирования: Ошибочно выполненные измерения выявляются при вычислении невязок в полигонах.

По полученным невязкам ходов и замкнутых фигур была вычислена средняя квадратическая ошибка одностороннего превышения по формуле

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{[\omega_h^2]}{i \cdot n_i}} = \pm 24 \text{ мм.}$$

где ω_i — невязка многоугольника (хода) с i сторонами; n_i — количество соответствующих многоугольников (ходов); i — число сторон в многоугольнике (ходе); средняя квадратическая ошибка получена в 2,0 раза точнее, чем по разностям превышений из геодезического и геометрического нивелирования. Это обстоятельство объясняется компенсацией рефракционных и других ошибок при передаче высот в ходах и замкнутых полигонах.

Уравнивание высот выполнено методом последовательных приближений на основе высот пунктов, полученных из нивелирования III и IV класса, расположенных по границе участка.

Общее количество исходных пунктов 21, расстояние между исходными пунктами до 35 км.

В уравнивание были включены односторонние превышения и частично двусторонние. Общее количество двусторонних превышений, включенных в уравнивание, составило 36%.

В результате уравнивания были вычислены средние квадратические ошибки уравненных высот, а именно:

а) средняя квадратическая ошибка высоты одного пункта

$$m_l = \pm \sqrt{\frac{[p \cdot \delta^2]}{n - 1}};$$

б) средняя квадратическая ошибка высоты пункта для всего участка

$$m = \pm \sqrt{\frac{[m_l^2]}{r}};$$

в) истинная средняя квадратическая ошибка высоты пункта

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_i^2]}{n}},$$

где Δ_i — разности высот, полученных в последнем приближении и определенных геометрическим нивелированием.

Средние квадратические ошибки уравненных высот составляют:

Ошибки	Значение ошибок, мм	Количество
m_l	0—10	70
	11—20	17
	21—30	2
m	10	—
m_0	34	—

Для сопоставления полученных результатов аналогичные вычисления были выполнены с использованием превышений, найденных по двусторонним зенитным расстояниям. При этом превышения вычислялись дважды: по формулам двустороннего нивелирования, полагая, что $K_{1,2} = K_{2,1} = K$, и с использованием рефракции на каждом пункте (табл. 2).

Таблица 2

Точность определения превышений и высот из геодезического нивелирования

Величины	Двустороннее геодезическое нивелирование по вариантам		Одностороннее геодезическое нивелирование
	I	II	
Средняя квадратическая ошибка превышения, вычисленная по разностям, $\Delta = h_{\text{геом}} - h_{\text{геод}}$, мм	37	43	48
Средняя квадратическая ошибка превышения, вычисленная по невязкам замкнутых фигур, мм	15	18	24
Истинная средняя квадратическая ошибка высоты пункта, вычисленная по разностям $H_{\text{геом}} - H_{\text{геод}}$, мм	31	29	34
Максимальное расхождение отметок, определенных геометрическим и геодезическим нивелированием, мм	77	75	96

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, точность уравненных высот пунктов из одностороннего геодезического нивелирования, выполненного в периоды спокойных изображений довольно высока и всего на 10% ниже точности высот, полученных из уравнивания двустороннего геодезического нивелирования.

Она характеризуется истинной средней квадратической ошибкой, равной ± 34 мм.

Такая точность достаточна для того, чтобы отметки пунктов триангуляции могли служить исходными для развития съемочного высотного обоснования при масштабе: 1:10 000 и крупнее с сечением рельефа через один метр.

Замена геометрического нивелирования двусторонним геодезическим нивелированием в равнинно-пересеченной местности с категорией трудности 5,5 позволяет сократить трудовые затраты на 25% и получить экономию материальных средств в размере 17% на каждый геодезический пункт. При частичном применении одностороннего геодезического нивелирования для

определения высот пунктов указанное сокращение трудовых и материальных затрат может быть увеличено в 1,7 раза.

Выполненные нами исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Одностороннее геодезическое нивелирование, выполненное в периоды спокойных изображений в равнинно-пересеченной местности, где эквивалентные высоты прохождения лучей более 10 м, может быть использовано для определения высот пунктов государственной геодезической сети III и IV классов по сторонам длиной 3—5 км при сгущении их для крупномасштабных съемок с сечением рельефа через один метр.

2. Средний коэффициент рефракций в эти периоды близок к значению $+0,140$ с ошибкой $\pm 0,01$, который может быть принят для вычисления односторонних превышений.

3. Качество односторонних превышений достаточно надежно определяется по невязкам замкнутых фигур.

4. При измерении зенитных расстояний следует избегать направлений, эквивалентные высоты которых незначительны (менее 5 м).

5. В тихую ясную погоду измерения зенитных расстояний следует выполнять в начале периода спокойных изображений в вечернюю видимость и в конце спокойных изображений утром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джуман Б. М. О точности измерения зенитных расстояний в период спокойных изображений при ветре. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1966, вып. 4.

2. Джуман Б. М. Определение вертикального градиента температуры геодезическим методом при нейтральной стратификации в приземном слое воздуха. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1974, вып. 20.

3. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.

4. Хижак Л. С. Связь между колебаниями изображений и ошибками углов рефракционного происхождения. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1964, вып. 1.

Работа поступила в редколлегию 22 января 1975 года. Рекомендована кафедрой инженерной геодезии Львовского политехнического института.