

З. Ф. ПАТОВА

## НЕКОТОРЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ В МЕТОДИКЕ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

В комплексе геодезических работ высокоточное нивелирование занимает одно из самых видных мест. Удельный вес его особенно вырос за последние 20 лет в связи с применением для количественной оценки современных вертикальных сдвигов земной коры.

Точность высокоточного нивелирования характеризуется случайной и систематической средними квадратическими ошибками на 1 км хода.

Современные сети высокоточного нивелирования как по методике построения, так и по точности в разных странах не однородны.

Высотноопорная сеть СССР является одной из самых обширных и самых точных в мире.

Ниже приведены средние квадратические ошибки на 1 км хода некоторых наилучших по точности сетей высокоточного нивелирования по странам:

|           | Случайные, мм | Систематические, мм |
|-----------|---------------|---------------------|
| СССР      | $\pm 0,29$    | $\pm 0,02$          |
| Финляндия | $\pm 0,33$    | $\pm 0,01$          |
| Польша    | $\pm 0,50$    | $\pm 0,04$          |

Как видим, точность современного высокоточного нивелирования в СССР довольно велика и достаточна для решения многих задач. Достижению ее способствовали главным образом научные исследования ЦНИИГАиК (1948—1954 гг.) и методика, принятая на их основании.

Однако в связи с дальнейшим развитием науки и техники, с повышением точности других видов геодезических и гравиметрических работ, приобретением высокоточным нивелированием новых функций возникает необходимость повышения его точности.

Производство высокоточного нивелирования сопровождается различного рода ошибками, систематическими и случайными. Исследования в этой области постоянно ведутся, методика их совершенствуется, при этом отмечается стремление к повышению точности работ и росту производительности труда и вместе с тем к снижению себестоимости 1 км нивелирования.

Вопрос повышения производительности нивелирования становится научной проблемой, ибо повышение скорости работ в большинстве своем ведет и к повышению их точности.

Имеется много факторов, понижающих точность определения высот и заслуживающих внимания исследователей, но поскольку речь в данной статье пойдет лишь о влиянии тепловых воздействий на нивелир и об ошибках, возникающих при привязках к маркам, то остальные здесь не упоминаются.

Согласно исследованиям ЦНИИГАиК [5], тепловые воздействия на нивелир являются одним из главных источников ошибок; именно они привели к неверным выводам исследователей, связывавших эти ошибки с влиянием рефракции. При изучении влияния каждого отдельного источника порознь, без учета влияния других, действительно нетрудно было ошибиться.

В нивелировании, как нигде более, ошибки разных источников настолько связаны между собой, что, проявляясь в конечном итоге наложенными друг на друга, могут вызвать недоумение, а при малом количестве опытов или при осреднении результатов привести к неправильным выводам, ибо при наложении друг на друга в зависимости от состояния источников в период исследования в одних случаях усиливают друг друга, в других, наоборот, ослабляют.

В 1965—1968 гг. мы исследовали влияние тепловых воздействий на нивелиры разных конструкций: НА-1, Ni-004 и K<sub>оп</sub>-007.

Опыты производились как в лаборатории, так и в полевых условиях. Лабораторные исследования и вычисления велись по методике ЦНИИГАиК [1, 3, 5]. Источником тепла служила лампа 300 вт с рефлектором. Части нивелира, не подвергающиеся нагреванию, защищались двумя фанерными экранами. Часть опытов каждой серии выполняли с одним экраном. Температура нагреваемой и ненагреваемой частей измерялась психрометрическими термометрами, подвешенными так, что шарики с ртутью касались соответствующих частей нивелира. Отсчеты по барабану микрометра брали через 1 мин при наведении на штрих толщиной 0,2 мм, нарезанный на стекле. Стеклопластинка в деревянной оправе устанавливалась в подставке с уровнями на другом столбе на расстоянии 5,34 м от нивелира.

Ниже указаны изменения угла  $i$ , соответствующие изменению температуры на 1°С при односторонних тепловых воздействиях на разные части нивелиров:

|                                                 | НА-1 | Ni-004 |                                                                   | K <sub>оп</sub> -007 |
|-------------------------------------------------|------|--------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Часть объектива (со стороны уровня)             | 1,9" | 1,8"   | Часть объектива (со стороны, противоположной барабану микрометра) | 0,4"                 |
| Окулярная часть (со стороны уровня)             | 2,2" | 2,0"   | Окулярная часть (со стороны, противоположной барабану микрометра) | 0,4"                 |
| Середина трубы нивелира (со стороны уровня)     | 3,8" | 3,4"   | Часть объектива (со стороны барабана микрометра)                  | 0,2"                 |
| Середина трубы (со стороны отсчетного барабана) | 1,0" | 0,6"   | Окулярная часть (со стороны барабана микрометра)                  | 0,1"                 |

Из этих данных видно, что наибольшие отклонения с измерением температуры испытывает визирная ось нивелира НА-1, немного меньше они в нивелире Ni-004, а в K<sub>оп</sub>-007 настолько малы, что практически их можно считать отсутствующими.

Тепловыравнивающий кожух, которым снабжены нивелиры Ni-004, действительно мгновенно распределяет температуру, но отнюдь не сохраняет при этом положения визирной оси (а точнее оси уровня); он только делает ее более подвижной и чуть-чуть уменьшает амплитуду отклонений. Но ведь резкая подвижность оси, на наш взгляд, не уменьшает, а скорее увеличивает ошибки  $\Delta a$  и  $\Delta b$  при отсчетах на заднюю и переднюю рейки, потому что за время отсчетов ось уровня успевает отклониться на гораздо большую величину, чем за то же время в нивелирах без термовыравнивающего кожуха, где эти отклонения идут намного медленнее.

Величины  $\Delta a$  и  $\Delta b$  не одинаковы, так как при нагревании разных частей нивелира визирная ось отклоняется по-разному, в превышения эти ошибки входят суммарной величиной, ибо при поворотах трубы на  $180^\circ$  оказываются с разными знаками.

Отрицательные превышения будут преувеличенными по абсолютной величине, когда Солнце сзади по ходу, и преуменьшенными, когда оно впереди. Положительные превышения — наоборот.

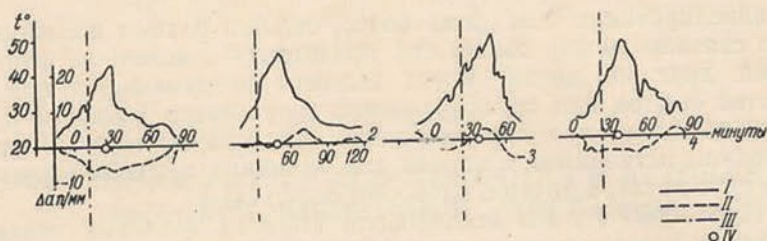


Рис. 1. Лабораторные исследования влияния тепловых воздействий на нивелир НА-1 в термозащитном кожухе:

I — температура; II — изменение отсчета по барабану при нагревании и охлаждении ( $\Delta a$ ); 1 — части объектива со стороны уровня; 2 — окулярной части со стороны уровня; 3 — середины трубы со стороны уровня; 4 — середины трубы со стороны микрометра, III — исследования продолжаются с одним экраном; IV — моменты прекращения нагревания.

В обратном ходе для отрицательных и положительных превышений существует соответственно противоположная картина. Для исключения ошибок  $\Delta a$  и  $\Delta b$  должны соблюдаться следующие условия:

1. Одна половина станций между постоянными знаками должна быть сделана при одном положении источника тепла по ходу, а вторая — при противоположном, или одни и те же участки секций в прямом и обратном ходе должны быть проложены при одинаковом положении источника тепла по отношению к соответствующему ходу и при одинаковой погоде.

2. Станций с одинаковыми длинами плеч должно быть поровну в обеих половинах. (Или то же самое в прямом и обратном ходах).

3. Ход температуры утром и вечером (или в прямом и обратном ходе) должен быть противоположным, но равным по интенсивности.

На практике редко бывают такие условия, чтобы уклон между реперами был одинаковым, интенсивность в ходе  $t$  примерно одинакова, расстояния между реперами такие, чтобы нивелирование между ними длилось целое количество дней и, наконец, погода в течение дня или нескольких дней была неизменной. Поэтому соблюсти условия 1—3 очень трудно. Думается, лучше идти по пути термостатирования нивелира или, по крайней мере, сведения изменений положения визирной оси (оси уровня) к настолько медленным, чтобы в пределах времени работы на одной станции их можно было считать практически равными нулю.

Мы попытались осуществить это, применяя специальный термозащитный кожух, который пристегивался вокруг трубы и уровня нивелира НА-1. Открытыми при этом оставались только необходимые части: стеклянное окошко и иллюминатор уровня, барабан фокусировки и оптического микрометра, объектив и окуляр, для которых в кожухе были сделаны небольшие прорезы. Кожух состоял из трех слоев: верхнего — из белой мягкой кожи, среднего — из ваты, нижнего — из паралона.

Лабораторные исследования термостатированного таким образом нивелира, проведенные по описанной методике, дали хорошие результаты. Изменения положения визирной оси стали медленными и незначительными по величине. На рис. 1 это показано в виде графиков.

Полевые исследования проводились с 4/VI по 19/VI 1966 г. в Крыму. На южном склоне в направлении запад—восток были закреплены временными реперами две линии — горизонтальная и наклонная с одним общим репером. Эталонные превышения по каждой из этих линий вычислены как средние из 160 превышений, измеренных при самой благоприятной погоде нивелиром Ni-004, коротким лучом (25 м), в прямом и обратном направлениях и соответственно были равны:  $(h_a)_r = -31,85$ , а  $(h_a)_n = +2581,54$ .

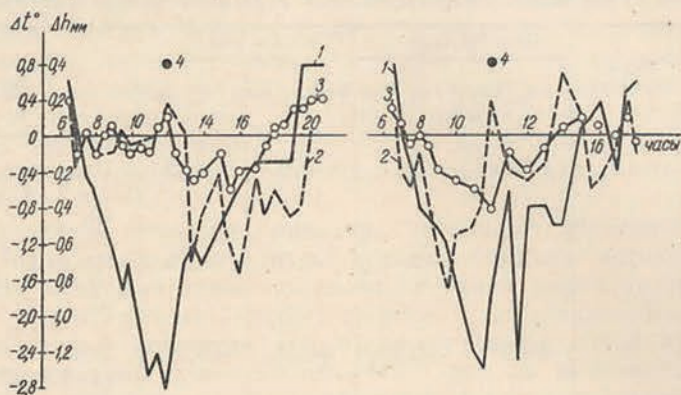


Рис. 2. Графики отклонений превышений в зависимости от теплзащиты нивелира, от рельефа и от состояния погоды (солнечно, тихо, жарко):

1 — температурный градиент; 2 — отклонения превышений, полученных нивелиром НА-1 без кожных; 3 — отклонения превышений, полученных нивелиром НА-1 в кожных; 4 — солнце зашло на 15 мин за тучу.

Затем два нивелира НА-1 при пасмурной прохладной погоде были тщательно исследованы и отъюстированы (углы  $i$  сведены до минимума). На один из нивелиров надели кожных и после двухчасовой выдержки еще несколько раз проверили угол  $i$ . Колебания были в пределах метода ( $2''$ ). Оба нивелира (один в кожных) устанавливали в середине закрепленных линий и с  $6^{00}$  до  $20^{00}$  попеременно обоими нивелирами через каждые полчаса определяли по этим линиям два превышения. Одновременно велись наблюдения метеозлементов. Температура измерялась на высотах 0,5 и 2,5 м психрометрическими термометрами, скорость ветра — анемометром, давление — барометром anerоидом. Для всех девяти дней наблюдений на каждые полчаса рабочего времени отдельно для каждого из двух нивелиров и двух линий были составлены ведомости превышений ( $h_i$ ) и их отклонений ( $v$ ) от эталонного ( $h_a$ )

$$v_r = h_i - (h_a)_r, \quad (v_r)_T = [h_i - (h_a)_r]_T,$$

и

$$v_n = h_i - (h_a)_n, \quad (v_n)_T = [h_i - (h_a)_n]_T.$$

Индексы г и н при величинах  $v$  и  $h_a$  обозначают, что эти величины относятся к горизонтальной или наклонной линиям, а  $T$  — к термостатированному нивелиру.

По отклонениям  $v$  и соответствующим им температурным градиентам были составлены графики для шести групп дней с различными характерными условиями погоды. На рис. 2 приведены графики только для одной группы. Справа для наклонного направления, слева — для горизонтального.

В таблице указаны суммы этих отклонений для всех групп характерных условий погоды, по обеим линиям и для обоих нивелиров.

Из графиков и таблицы видно, что термозащитные качества кожуха довольно хорошие и его применение при нивелировании уменьшит систематическую ошибку от тепловых воздействий в 3—4 раза.

На основании той же таблицы можно заметить, что очень опасной систематической ошибкой большого периода действия является влияние ветра, хотя некоторые исследователи отдают предпочтение работе при ветре [2].

#### Колебания сумм вероятнейших ошибок в высокоточном нивелировании

| Дата       | Кол-во станций | НА-1 без кожуха    |                    | НА-1 в кожухе            |                          | Погода                                     |
|------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
|            |                | $\Sigma v_{Г, мм}$ | $\Sigma v_{В, мм}$ | $\Sigma (v_{Г})_{Г, мм}$ | $\Sigma (v_{В})_{Г, мм}$ |                                            |
| 10/VI 1966 | 13             | -0,84              | -2,77              | -0,41                    | -0,82                    | Пасмурно,<br>$v_{В}=2-4$ м/сек<br>Ю. З.    |
| 11—16/VI   | 31             | -2,27              | +2,82              | -0,77                    | +1,65                    | Пасмурно,<br>$v_{В}=2,6$ м/сек<br>Ю. В. В. |
| 12/VI      | 22             | +3,90              | +0,98              | +0,65                    | +0,10                    | Ясно,<br>$v_{В}=0,4$ м/сек<br>Зап.         |
| 14—15/VI   | 44             | +3,60              | +6,10              | +0,41                    | +2,90                    | Ясно,<br>$v_{В}=1,5-5$ м/сек<br>Ю. В. В.   |
| 17/VI      | 22             | -3,90              | -1,72              | -0,41                    | -0,65                    | Ясно, тихо                                 |
| 18—19/VI   | 40             | -1,50              | +4,40              | +0,44                    | +2,66                    | Переменная,<br>$v_{В}=4-7$ м/сек<br>Вост.  |

Во всех случаях работы при сильном ветре ( $v_{В}=5-7$  м/сек) получились большие положительные отклонения  $\Sigma v_{Г}$  и  $\Sigma v_{В}$ , которые мало уменьшились при нивелировании термостатированным нивелиром. Систематическое заваливание реек от наблюдателя или к нему при ветре, направленном вдоль линии нивелирования, увеличивает отсчеты по рейке, стоящей ниже, а следовательно, и абсолютные величины превышений.

В таких случаях необходимо применять специальные подпорки для реек. Ими могут служить металлические трубки длиной 1,5 м и диаметром 15—20 мм, у которых одни концы упираются в землю, а другие удерживаются реечником вместе с ручками реек. После отрегулирования уровня трубки крепко зажимаются руками в одном положении. Работу при ветре со скоростью более 7 м/сек нужно прекращать.

#### ОШИБКИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИВЯЗКОЙ К СТЕННЫМ МАРКАМ

Очень часто хорошее качество нивелирования страдает от ошибок при привязке секций к маркам. Для таких привязок, как известно, используются специальные однометровые деревянные подвесные реечки, которые в отличие от основных реек не имеют инварной полосы. Деления на реечках нанесены много грубее, чем на основных, и компарированию на стационарных компараторах не подвергаются.

Подвесная реечка при привязках подвешивается на штифт, вставленный в отверстие марки. При этом возникает много трудностей:

а) отверстия марок имеют разную величину, и трудно подобрать соответствующий им штифт; б) глубина отверстия марки обычно мала и штифт легко сгибается под тяжестью реечки; в) в вертикальное положение реечку приходится устанавливать на глаз; г) выступы на стенах часто не позволяют установить реечку без наклона в сторону наблюдателя (или от него).

Мы для этой цели изготовили специальную маленькую тоненькую стальную линейку длиной 8 см с делением через 0,5 см, как и в основных рейках. Нулевой штрих — в середине линейки, вверх и вниз идут деления соответственно с плюсом и минусом. Укрепить линейку к марке можно либо с помощью штифта, если он хорошо подходит, либо с помощью клея БФ или даже пластилина, совместив при этом отверстия линейки и марки. Так как в линейке нет дополнительной шкалы, то привязку нужно делать только по основной шкале с трехкратной сменой горизонта (привязку положено делать при двух горизонтах).

Исследование точности привязки с помощью подвесной реечки и линейки было выполнено нами следующим образом: в тихую, пасмурную погоду в 12 м от невысоко расположенной марки устанавливался нивелир с таким расчетом, чтобы отверстие марки можно было вводить непосредственно в биссектор. Это было трудно, но для получения эталонного превышения  $h_0$  необходимо. На таком же расстоянии от нивелира за несколько дней до исследований был заложен временный репер (метровый деревянный столб с вбитым в него колышком). В рабочее для нивелирования время сделано измерение  $h_0$  в течение двух дней через 10 минут с небольшой сменой горизонта подъемными винтами. Из 120 полученных  $h$  взято среднее  $h_0$ . Затем четыре дня измерялись превышения  $h_p$  и  $h_l$  попеременно с использованием реечки и линейки. Каждое из этих превышений получено 40 раз ( $n=40$ ).

Подсчитаны уклонения от эталонного превышения, превышений, полученных с применением реечки  $\Delta_p = h_p - h_0$  и линейки  $\Delta_l = h_l - h_0$ . Вычислены средние квадратические ошибки:

$$m_p = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_p \Delta_p]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{67,60}{40}} = \pm 1,30 \text{ мм};$$

$$m_l = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_l \Delta_l]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{4,62}{40}} = \pm 0,34 \text{ мм}.$$

Точность привязки линейкой в четыре раза выше, чем подвесной реечкой. Если линейку изготовить из инвара или другого термостойкого материала, точность будет еще выше.

Широко применялся способ привязки линейкой при нивелировании Крымского геофизического полигона в 1966 г. Из 13 марок, имеющих на полигоне, не удалось привязаться только к одной (из-за ее высоты). Закладку марок нужно делать ниже (на высоте визирного луча 1,4—1,5 м), так как даже при привязке подвесной реечкой лучше, чтобы последняя располагалась вверх от отверстия марки, а не вниз.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Применение термозащитного кожуха на нивелиры с уровнями повышает точность нивелирования в три-четыре раза.
2. Нельзя вести работу при ветре со скоростью свыше 7 м/сек; при скорости 4—7 м/сек необходимо применять подпорки для реек.
3. Привязка к маркам с помощью специальных маленьких линейек увеличивает точность привязки в четыре раза.

4. Применение эклиметра и одномоетровой полотняной шашечной реечки при установке станций на местности с беспокойным рельефом повышает производительность труда на 20%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королева В. П. Исследование нивелира Ni-004. «Геодезия и картография», № 4, 1957.
2. Крупен Р. В. Влияние некоторых метеорологических условий на точность нивелирования. «Геодезия, картография», № 10, 1968.
3. Мещерский И. Н., Энтин И. И. Исследование нивелира НБ-4. «Геодезия, картография», № 4, 1962.
4. Патова З. Ф. Накопление и компенсация ошибок от внешних условий на геометрическое нивелирование линий с затяжными уклонами. В сб. «Современные движения земной коры», № 3, М., 1968.
5. Энтин И. И. Высототочное нивелирование. Труды ЦНИИГАиК, вып. 111, 1968.

Работа поступила  
1 декабря 1969 года.