

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ВИЗИРНОГО ЛУЧА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Закономерность распределения температуры и влажности с высотой в нижнем трехметровом слое атмосферы наблюдается редко, чаще всего при устойчивой ясной со средним ветром погоде. Исходя из этого, можно предположить, что визирный луч при нивелировании искажается тем больше, чем ближе он проходит над поверхностью земли.

Вопрос о влиянии высоты визирного луча на результаты высокоточного нивелирования исследовался неоднократно. Только в ЦНИИГАиК этот вопрос ставился дважды в 1933—1935 гг. Н. А. Павловым [3] и в 1948—1955 гг. — группой исследователей во главе с И. И. Энтиным [6].

В результате исследований Н. А. Павлова было установлено, что разности превышений Δh , определенные с высокого $\Delta h_{\text{выс}}$ и обычного $\Delta h_{\text{обыч}}$ штативов зависят от профиля местности и что повышение визирного луча инструмента на 2 м уменьшает влияние рефракции два раза.

Повторные исследования [6] не подтвердили этих выводов, а показали, что изменение отсчетов рефракцией по задней и передней рейкам идет совершенно одинаково независимо от высоты визирного луча над землей.

В ясную тихую погоду кривые обих лучей систематически изменяются, что приводит утром к постепенному увеличению, а вечером к уменьшению отсчетов по обеим рейкам.

Был проведен опыт четырехкратного нивелирования замкнутого полигона длиной 9,2 км, разделенного реперами на четыре секции. Нивелирование производилось одновременно одинаковыми нивелирами, установленными один на высоком, а другой на обычном штативах. Приведенные по четырем секциям и четырем ходам (двум прямым и двум обратным) разности $\Delta h = h_{\text{выс}} - h_{\text{обыч}}$ [6], если рассматривать их вместе,

лежат в пределах случайных ошибок, но если рассматривать Δh в отдельных ходах, то в первом прямом все Δh положительны с общей суммой $+3,7$ мм; во втором прямом они все отрицательны с суммой $-3,0$ мм; в первом обратном Δh с разными знаками и суммой $+0,1$ мм; во втором обратном в Δh преобладает минус, а сумма $-0,5$ мм.

Общая сумма Δh из четырех ходов равна $+0,3$ мм. Величины невязок в полигоне по данным четырех ходов лежат в пределах допустимых, однако во всех ходах, проложенных с высокого штатива они значительно меньше, чем с обычного.

Подобный опыт был поставлен в Югославии Стефановичем [8]. В течение 2,5 месяцев производилось нивелирование в прямом и обратном направлении замкнутого полигона длиной 6 км. Нивелир Ni 3 Вильд попеременно устанавливался на высоком (2 м), нормальном (1,3 м) и низком (0,8 м) штативах. Невязки в полигоне получились соответственно $-0,71$, $-2,52$, $-6,28$ мм.

В Венгрии Хёньи [7] при исследовании нивелирной рефракции приходит к выводу, что поднятие визирного луча нивелира способствует уменьшению ошибок нивелирования.

В работе Е. С. Ковалева [2] получен такой же результат, как и у Н. А. Павлова, то есть повышение луча в два раза уменьшает ошибки нивелирования в 1,7 раза. И. М. Иванова [1] на основании трехдневных стационарных наблюдений пришла к выводу, что влияние рефракции имеет как систематический, так и случайный характер, увеличение высоты луча более 1,85 м нецелесообразно, нужно лишь сократить длину визирного луча и считать оптимальной длину 35 м. Инструмент предлагается ставить на высоту не менее 1,1 м.

Как видно из краткого описания опытов, выполненных в разных местах и в разное время, у исследователей нет единого мнения по этому вопросу.

В связи с этим продолжают исследования по изучению влияния высоты визирного луча на результаты высокоточного нивелирования. Было бы неверно назвать эти влияния рефракцией, ибо в данном случае, как и вообще при нивелировании, имеет место комплекс различного рода влияний. Основные из них: тепловые воздействия на нивелир и рейки, как общие, так и односторонние; рефракция; неодинаковая освещенность реек; вертикальные перемещения костылей и штатива, если исследования ведутся по длинным ходам, как в [2, 6 и 8].

Наши исследования производились в 1970 году. Хорошо отъюстированным нивелиром НА-1 нивелировалась 200-метровая линия с наклонным профилем с двух станций со штативов разной высоты:

1) высокого, устанавливаемого на вкопанные в землю двухметровые толстые деревянные столбы, выступающие из земли на высоту 1 м, так что общая высота инструмента I при этом была 2,2 м;

2) среднего (нормального), устанавливаемого на столбы, вкопанные вровень с землей ($I=1,35$ м);

3) низкого, устанавливаемого на колья, вбитые в ямы глубиной 0,6 м ($I=0,70$ м).

Рейки ставились на рядовые грунтовые реперы $Rp1$, $Rp2$ и $Rp3$, заложенные по линии через 100 м. Таким образом, ошибок перемещения костылей в данном нивелировании не было.

Ориентирование линии в направлении север-юг в большой мере уменьшало ошибки неодинаковой освещенности реек [4].

Пара станций бралась для компенсации ошибок от неравенства высот нулей пятков реек.

Высокий и низкий штативы на обеих станциях располагались так: на первой станции низкий штатив находился справа от среднего, а на второй станции он был слева от среднего; высокий штатив — наоборот.

Расположение реперов и станций показано на рис. 1.

Нивелирование выполнялось по симметричной программе: нечетная станция — ЗППЗ; четная — ПЗЗП. Наблюдения велись в периоды с 5.00 до 11.30 час утра и с 15.00 до 21.00 час вечера попеременно со штативов разной высоты. На выполнение одной станции со всех трех штативов требовалось 20—25 мин, а весь цикл работы на двух станциях выполнялся за 1 час. В день производилось 12 циклов (6 — утром и 6 — вечером), что составляет 36 пар станций.

Наблюдения продолжались восемь дней, из которых в течение четырех нивелир защищался только зонтом; следующие два дня нивелир был под зонтом и снизу изолировался от земли прикрепленными к специальным колям мензульными чехлами, чтобы тепловые излучения от подстилающей поверхности не воздействовали на нивелир; последние два дня наблюдения велись нивелиром, на трубу которого надевался термозащитный кожух, описанный в [5].

Погода все восемь дней была ясная, устойчивая, со слабым ветром.

Так как при обработке материала из превышений ряда пар станций предполагалось составить замкнутые непрерывные ходы, то первые четыре дня, когда нивелир был только под зонтом, наблюдения велись так: первый и четвертый дни в направлении от $Rp1$ к $Rp3$; второй и третий — в направлении от $Rp3$ к $Rp1$.

Таким образом, из наблюдений первого и второго дней составлен прямой ход, а из наблюдений третьего и четвертого — обратный ход. Каждый из ходов состоит из 24 пар станций и равен 4,8 км.

Исследования с защитой нивелира от тепловых влияний земли, а также нивелиром в термозащитном кожухе сделаны только в прямом направлении. В первые дни наблюдения велись в порядке $Rp1-Rp3$, а во втором — $Rp3-Rp1$.

В начале и конце работы на каждой станции для каждой высоты инструмента велись наблюдения температуры на высотах 0,5 и 2,5 м над землей по психрометрическим термометрам, подвешенным на кронштейне, укрепленном в середине 200-метровой линии возле репера 2. Термометры защищались тентами.

При обработке были составлены суммы превышений двух станций на каждый рабочий час дня для каждой из высот нивелира в отдельности. В эти суммарные превышения введены поправки за компарирование реек и разность температур при компарировании и нивелировании.

Из всех превышений, полученных нивелиром под зонтом, составлены ведомости прямых и обратных ходов отдельно для каждой из высот нивелира. Такие же ведомости, но только прямых ходов, составлены из наблюдений, выполненных нивелиром с термозащитой снизу и нивелиром в кожухе отдельно для каждой из трех высот нивелира. Подсчитаны невязки (f_h) по всем 12 одиночным ходам и трем средним, полученным из средних превышений прямых и обратных ходов нивелирования под зонтом отдельно для разных высот нивелира; кроме того, определено колебание превышений в каждом из ходов и произведена оценка точности.

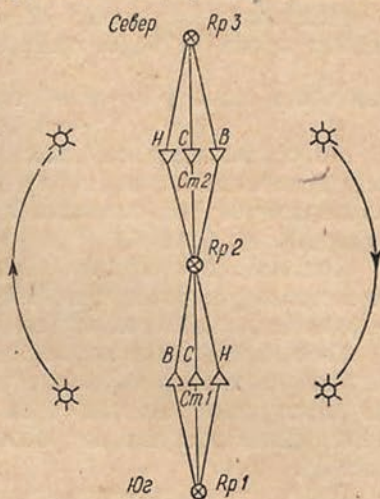


Рис. 1. Схема расположения реперов и станций.

Вероятнейшее превышение выведено из многократно определенных превышений между реперами 1 и 3. При этом использовались все превышения независимо от высоты инструмента и условий термозащиты нивелира, которым придавались разные веса.

Вероятнейшее значение (h_0) между реперами 1 и 3 из 288 значений оказалось равным 2210,94 мм.

Получены отклонения (d_i) всех превышений (h_i) в одиночных и средних ходах от вероятнейшего (h_0). Из них исключена систематическая часть ошибок $\theta = \frac{\Sigma d_i}{n}$, где $n=24$ — число d_i или h_i в ходе.

По оставшимся случайным ошибкам $v_i = d_i - \theta$ вычислены средние квадратические ошибки определения превышения на двух станциях. Результаты оценок точности и невязки по одиночным и средним ходам приведены в таблице.

Составлены графики зависимости изменений превышений от изменений температурных градиентов и от разностей двух средних, соседних по времени, наблюдаемых на высоте 0,5 м и 2,5 м температур.

Оказалось, что изменения превышений следуют за температурным градиентом только в ранние утренние 2—2,5 час, а в остальное время дня между ними нет никакой корреляции. Гораздо лучше изменения превышений следуют за разностями соседних по времени температур (рис. 2).

Анализ результатов исследований показывает, что максимальное дневное колебание отдельных превышений достигает 1,7 мм у ходов одного направления при работе с низкого штатива нивелиром, защищенным только зонтом.

Для превышений, полученных нивелиром с изоляцией от земли, колебания превышений составляют 0,4; 0,5 и 0,8 мм, а для превышений, определенных нивелиром в кожухе — 0,2, 0,4 и 0,6 мм соответственно для высокого, среднего и низкого штативов.

В средних превышениях из прямых и обратных ходов колебания превышений несколько уменьшаются (примерно на 1/4).

Так как между изменениями превышений и температурными градиентами корреляция слабая, то рефракционные влияния в нивелировании невелики и не имеют длинно-периодического систематического хода.

Основные систематические ошибки получаются от влияния тепловых воздействий и не только сверху, от Солнца, но и снизу, от Земли. Это видно по большим величинам систематических составляющих в ходах, проложенных с низкого штатива (от 0,4 до 0,5 мм на две станции).

Невязки в замкнутых полигонах всегда больше в ходах, проложенных с низкого штатива. Как правило, в одиночных ходах они имеют одинаковые знаки при любых высотах инструмента и противоположные — для ходов разного направления.

По абсолютной величине невязки резко растут в зависимости от высоты инструмента, увеличиваясь почти вдвое при понижении инструмента на 0,7 м. В средних ходах невязки для разных высот с разными знаками.

В ходах, проложенных с изоляцией нивелира от земли, наблюдается интересное явление. Минимальная невязка получилась в ходе, проложенном со среднего штатива; для высокого штатива невязка осталась такой же, как и в прямом ходе, проложенном нивелиром под зонтом, а для низкого — уменьшилась по величине, но изменила знак. Это объясняется тем, что при средней высоте штатива в случае такой изоляции нивелира от земли, как это было у нас, влияние тепла снизу и сверху уравновешивается и положение визирной оси остается неизменным, в то

Результаты исследования точности нивелирования со штативов разной высоты

Высота штатива	Нивелир под зонтом											
	Прямой ход				Обратный ход				Среднее из прямого и обратного хода			
	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	μ , м/м	θ , м/м	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	μ , м/м	θ , м/м	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	μ , м/м	θ , м/м
2,20	+1,14	0,55	$\pm 0,18$	-0,05	-2,88	0,66	$\pm 0,25$	-0,09	0,46	-1,01	$\pm 0,18$	-0,07
1,35	+3,61	1,07	$\pm 0,28$	-0,06	-3,74	1,10	$\pm 0,28$	-0,10	0,79	-2,19	$\pm 0,25$	-0,07
0,70	+5,61	1,69	$\pm 0,32$	-0,50	-6,30	1,39	$\pm 0,29$	-0,39	1,16	+4,07	$\pm 0,27$	-0,40
	Нивелир изолирован снизу от земли											
	Прямой ход											
Высота штатива	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	θ , м/м	μ , м/м	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	μ , м/м	θ , м/м	f_h , м/м	колебание h_i , м/м	μ , м/м	θ , м/м
2,20	+1,18	0,36	+0,02	$\pm 0,17$	-0,06	0,17	$\pm 0,17$	+0,01	+0,01	0,17	$\pm 0,03$	+0,01
1,35	+0,12	0,52	+0,07	$\pm 0,20$	+0,42	0,39	$\pm 0,20$	+0,02	+0,02	0,39	$\pm 0,17$	+0,02
0,70	-2,28	0,77	+0,15	$\pm 0,27$	-0,57	0,60	$\pm 0,27$	-0,01	-0,01	0,60	$\pm 0,28$	-0,01

Примечание: f_h — невязки по одиночным и средним ходам длиной 4,8 км;

θ — систематическая часть ошибок нивелирования $\dots \theta = \frac{\sum di}{n}$;

n — число пар станций в ходе;

μ — среднеквадратическая ошибка нивелирования на двух станциях.

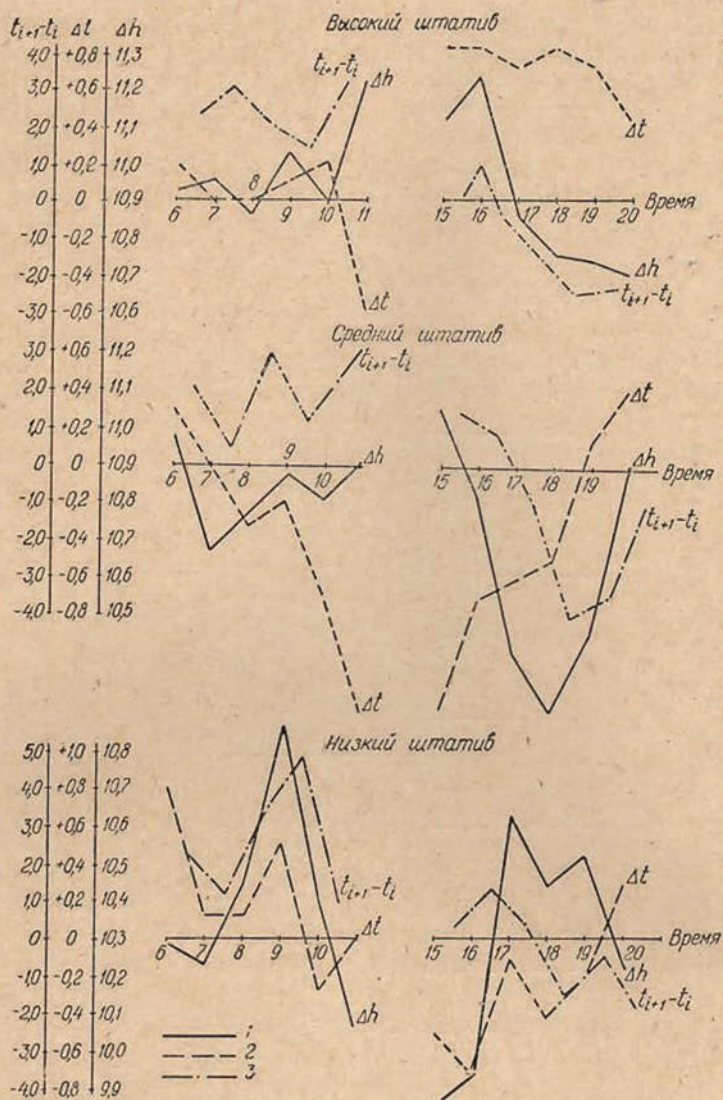


Рис. 2. Графики зависимости изменений превышения от изменений температурного градиента и разностей двух средних, наблюдаемых на высотах 0,5 м и 2,5 м над землей, соседних по времени температур:

1 — изменения превышения; 2 — температурные градиенты; 3 — разности соседних по времени температур.

время как при низком штативе тепловые влияния сверху становятся намного интенсивнее, чем снизу, и визирная ось претерпевает изменения в направлении, обратном тому, что было до изоляции нивелира от земли.

При высоком штативе изоляция от земли большого влияния не оказывает, ибо при такой высоте (2,2 м) излучения снизу, очевидно, мало доходят до нивелира.

В ходах, проложенных нивелиром в термозащитном кожухе, невязки, даже в одиночных ходах, очень малые по величине и имеют разные знаки. Небольшими были также систематические части ошибок, а среднеквадратические случайные ошибки резко уменьшились только для

наблюдений с высокого штатива, оставшись для среднего и низкого штатива почти такими же, как и во всех других ходах.

Очевидно, что в эти среднеквадратические ошибки и входят ошибки от влияния рефракции и что для борьбы с этими влияниями повышение визирного луча является действенной мерой.

Подытоживая сказанное, следует отметить, что повышение высоты инструмента на 1 м уменьшает ошибки высокоточного нивелирования в 2,2 раза; но поскольку подъем нивелира на высоту более двух метров создает трудности, связанные с необходимостью подъема наблюдателя и реек, то целесообразнее будет изолировать нивелир от земли, тогда за оптимальную высоту инструмента на станции следует принять 1,40—1,80 м; высота от 1,40 до 1,80 м является последней ступенью перегиба функции температурного градиента, за которой Δt начинает изменяться уже почти линейно [3]; прямые и обратные ходы следует прокладывать при одинаковом типе погоды, но в разные периоды дня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова И. М. Влияние рефракции на геометрическое нивелирование в зависимости от высоты и длины визирного луча. — «Проектирование», 1970, вып. 2.
2. Ковалев Е. С. Влияние вертикальной рефракции на точность нивелирования наклонным лучем. — «Тр. Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта», 1969, вып. 95.
3. Павлов Н. А. Рефракция в высокоточном и точном нивелировании. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1937, вып. 23.
4. Патова З. Ф. Ошибки от неодинаковой освещенности реек в геометрическом нивелировании высокой точности. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1969, вып. 8.
5. Патова З. Ф. Некоторые усовершенствования в методике высокоточного нивелирования. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1971, вып. 13.
6. Энгтя И. И. Высокоточное нивелирование. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1956, вып. 111.
7. Хёнъи Е. Исследование возможностей уменьшения ошибок за рефракцию в нивелировании. — «Geod. es kartogr.», 1961, № 4.
8. Стефанович Й. Систематическое влияние нивелирной рефракции. Определение v и C в уравнении Куккамяки. — «Lb. Geod. inst. Univ Beogradu», 1958, № 1.

Работа поступила 22 апреля 1974 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.