

УДК 528.024.1

З. Ф. ПАТОВА

ОШИБКИ ОТ НЕОДИНАКОВОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ РЕЕК В ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Ошибки от неодинаковой освещенности реек изучены недостаточно хорошо. Из опытов ЦНИИГАиК [4], выполненных в основном в лаборатории и немного на полигоне, были получены результаты, отрицающие систематический характер такого рода ошибок. Однако отмечалось, что при выполнении наблюдений на рейку, поставленную в направлении на Солнце, точность отсчетов по ней падала на 50% и более.

Значит, ошибки от влияния этого источника могут быть очень большими, когда нивелирование ведется в утренние и вечерние часы при нахождении Солнца близ горизонта, а точнее — в промежутки времени протяжением 0,5—1 часа, в середине которых происходит восход и заход Солнца. Значительные ошибки могут оставаться еще и за пределами этих промежутков, пока Солнце не поднимется достаточно высоко.

Особенно большие ошибки будут в случае расположения линий нивелирования в направлении запад—восток (или наоборот), поскольку в этом положении создаются неодинаковые и плохие условия освещения реек. Для одной рейки на станции яркость становилась даже излишне повышенной, с бликами, размывающими отчетливость изображения штрихов и ослепляющими наблюдателя, а другая рейка находилась в густой собственной тени и длинных накладывающихся друг на друга тенях от окружающих предметов и еще была притуманена подсвеченной дымкой, а иногда туманом или испарениями, исходящими от Земли.

Плохая видимость усугублялась еще и тем, что глаз наблюдателя не успевает аккомодироваться при переходе от очень яркого изображения к темному.

Для исследования ошибок от неодинаковой освещенности реек нами были проведены полевые опыты, которые, на наш взгляд, дали некоторое представление о величине этих ошибок и характере их влияния.

Исследования проводились в июле 1964 г. в Судовой Вишне Львовской области. Со станции, находящейся в точке пересечения двух 100-метровых линий, расположенных под углом 90° друг к другу и направленных одна — север—юг, а другая — запад—восток, производилось нивелирование I класса концов этих линий в следующие периоды дня:

- 1) с рассвета, когда еще не восходило Солнце, до 9 часов утра;
- 2) с 9 часов до 11 часов;
- 3) с 16 часов до 18 часов;
- 4) с 18 часов до наступления сумерек.

Под восходом и заходом Солнца в данном случае и в дальнейшем подразумевается момент пересечения диска Солнца линией видимого на данном участке горизонта.

Наблюдения обоих превышений $h_{с-ю}$ и $h_{з-в}$ велись в первый и четвертый периоды через 15 минут, а во второй и третий периоды — через 30 минут. Наблюдения метеозлементов во все периоды делались через 30 мин в целые часовые и получасовые моменты. Обе линии располагались на ровной местности, свободной от близости каких-либо местных предметов. Горизонт с востока и запада находился почти на уровне высоты нивелира. Высота нивелира над землей составляла 1,4 м. Длина плеч при определении обоих превышений была по 50 м.

Нивелир на станции устанавливался на заранее заложенные деревянные столбы. Над нивелиром устанавливался на растяжках топографический зонт с удлиненными на 30 см спицами и подшитый с обеих сторон плотным белым полотном с прослойкой ваты между основной тканью и верхним слоем белого полотна. Высота визирного луча над поверхностью земли была в обоих случаях не меньше 1,3 м. Во все дни исследований нивелир выносился и устанавливался на штативе за час до начала наблюдений.

Рейки, снабженные подпятниками, устанавливались на заложенные по концам линий рядовые репера.

Наблюдения сопровождалось измерениями температуры, влажности и атмосферного давления. Температура измерялась психрометрами в шести точках: возле инструмента и обеих реек и на двух высотах — 0,5 и 2,5 м над землей. Все психрометры были защищены от прямых солнечных лучей специальными тентами, укрепленными на расстоянии 0,5—1,0 м от них. Давление измерялось только на станции барометром-анероидом на высоте инструмента. Программа наблюдений была принята следующая:

Прямой ход

1. Отсчет давления по анероиду.
2. Отсчеты нижних психрометров по сухим и влажным термометрам в порядке: северный, восточный, южный, западный, средний (у инструмента).
3. Отсчеты верхних психрометров по сухим и влажным термометрам в том же порядке.
4. Отсчеты по основным шкалам реек в порядке: северная, восточная, южная, западная.
5. Отсчеты по дополнительным шкалам реек в том же порядке.

Обратный ход

6. Отсчеты по основным шкалам реек в порядке: южная, западная, северная, восточная.
7. Отсчеты по дополнительным шкалам в том же порядке.
8. Отсчеты по верхним психрометрам в порядке: северный, восточный, южный, западный и средний.
9. Отсчеты по нижним психрометрам в том же порядке.
10. Отсчет давления.

В пятнадцатиминутные моменты времени отсчеты по метеоприборам не брались.

Имеется 11 дней таких наблюдений в период с 1 по 16 июля 1964 г. Из них в обработку взято 9 дней, по 3 дня с резко различными условиями погоды:

- а) неустойчивая, с переменной облачностью, но сухая погода;
- б) устойчивая, солнечная, сухая погода;
- в) устойчивая, пасмурная, сухая погода.

Ветер все эти дни был почти одинаково слабым.

Два дня в обработку не взяты потому, что один день была очень ветреная погода, а наблюдения второго дня прерывались дождями.

После обработки полученных материалов были составлены ведомости, по которым построены графики изменений обоих превышений за каждый рабочий прием на все дни.

Величины вероятнейших превышений по обоим линиям определялись из большого числа наблюдений, симметричных как в отношении времени работы на станции, так и в отношении утренних и вечерних часов дня.

Наблюдения эти велись к тому же при длине луча 25 м (каждая станция делилась на две) и в самых благоприятных условиях — в дни с устойчивой, сухой и слабоветреной погодой. Величины вероятнейших превышений направлений север—юг и запад—восток, полученные из нивелирования коротким лучем, оказались соответственно равны:

$$h_{с-ю}^k = + 110,220;$$

$$h_{з-в}^k = + 86,300.$$

Ход разнонаправленных превышений $h_{с-ю}$ и $h_{з-в}$ хорошо совпадал только в дни с пасмурной погодой; в дни с солнечной и переменной погодой он был резко различен. Ходы однонаправленных превышений в дни с одинаковыми условиями погоды совпадали хорошо, поэтому для таких дней $h_{с-ю}$ и $h_{з-в}$, полученные на каждый пятнадцатиминутный и получасовой периоды, были по отдельности осреднены. Ниже помещена табл. 1 однодневного хода средних из трех дней превышений и средних температурных градиентов для линий двух направлений: север—юг и запад—восток в зависимости от состояния погоды. В графах 3, 5, 7, 9 и 11, 13 даны изменения превышений направлений север—юг и запад—восток для трех различных условий погоды. Они получены как разность:

$$\Delta h_{с-ю} = h_{ср. i}^{с-ю} - h_{с-ю}^k,$$

$$\Delta h_{з-в} = h_{ср. i}^{з-в} - h_{з-в}^k$$

для солнечной погоды и также для двух других условий погоды.

Из-за громоздкости в табл. 1 упущены пятнадцатиминутные наблюдения в первый и четвертый периоды, как не изменяющие общего хода превышений. На рис. 1 приводятся суммарные графики изменений превышений Δh для трех основных условий погоды, указанных в пунктах а, б, в. Графики построены по таблицам, в которых пятнадцатиминутные Δh не упущены. На эти же графики нанесены средние температурные градиенты Δt , соответствующие средним из трех дней превышениям на данный получасовой период. Так как величины средних температурных градиентов на данный получасовой период для направлений север—юг и запад—восток отличались очень мало, то на графиках показаны средние их значения (рис. 1).

В величины Δh входят, конечно, не только ошибки от неодинаковой освещенности реек, но и рефракционные — в графиках их не трудно заметить и можно довольно точно разделить.

Вообще-то ошибки от влияния рефракции проявляются больше на наклонных участках, и их ход в графиках должен в основном следовать за ходом температурных градиентов, ибо температура больше всего определяет плотность воздушных слоев.

При наших исследованиях был выбран горизонтальный участок, тем не менее на всех графиках отчетливо видно, что рефракционные ошибки имели место.

Дневной ход превышений (в мм) направлений север—юг и запад—восток
в зависимости от состояния погоды

Часы	Переменно					Солнечно					Пасмурно					Температурные градиенты Δt				
	1, 2, 4 июля 1964 г.					7, 8, 9 июля 1964 г.					10, 12, 14 июля 1964 г.					Переменно				
	$t_{\text{ср}}$	$\Delta h_{\text{с-ю}}$	$z_{\text{ср}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	$t_{\text{ср}}$	$\Delta h_{\text{с-ю}}$	$z_{\text{ср}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	$t_{\text{ср}}$	$\Delta h_{\text{с-ю}}$	$z_{\text{ср}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	$\Delta h_{3-\text{в}}$	1, 2, 4 июля	Солнечно	Пасмурно	7, 8, 9 июля	11, 12, 14 июля
5	+110,332	+0,112	+86,044	-0,256	+86,200	+110,280	+0,060	+86,200	-0,100	+110,400	+0,180	+86,370	+0,070	+0,08	+0,05	+0,08	+0,05	—	+0,05	—
5.30	+110,416	+0,196	+85,900	-0,400	+86,180	+110,320	+0,100	+86,180	-0,120	+110,438	+0,218	+86,400	+0,100	+0,18	+0,11	+0,18	+0,11	+0,07	+0,11	+0,07
6	+110,544	+0,324	+85,600	-0,700	+85,640	+110,420	+0,200	+85,640	-0,660	+110,438	+0,218	+86,400	+0,100	+0,30	+0,26	+0,30	+0,26	+0,13	+0,26	+0,13
6.30	+110,360	+0,140	+85,862	-0,438	+85,640	+110,460	+0,240	+85,640	-0,700	+110,420	+0,200	+86,440	+0,140	+0,28	+0,34	+0,28	+0,34	+0,15	+0,34	+0,15
7	+110,242	+0,022	+85,900	-0,400	+86,136	+110,428	+0,208	+86,136	-0,164	+110,340	+0,120	+86,430	+0,130	+0,25	+0,35	+0,25	+0,35	+0,16	+0,35	+0,16
7.30	+110,152	-0,068	+85,850	-0,450	+86,120	+110,280	+0,060	+86,120	-0,180	+110,320	+0,100	+86,360	+0,060	+0,10	+0,22	+0,10	+0,22	+0,10	+0,22	+0,10
8	+110,092	-0,128	+85,700	-0,600	+86,100	+110,180	-0,040	+86,100	-0,200	+110,260	+0,040	+86,300	0	-0,14	+0,08	-0,14	+0,08	+0,08	+0,08	+0,08
8.30	+110,112	-0,108	+85,900	-0,400	+86,040	+110,084	-0,136	+86,040	-0,260	+110,140	-0,080	+86,264	-0,036	-0,12	-0,11	-0,12	-0,11	+0,07	-0,11	+0,07
9	+110,163	-0,057	+86,140	-0,160	+86,000	+110,040	-0,180	+86,000	-0,300	+110,090	-0,130	+86,280	-0,020	-0,10	-0,19	-0,10	-0,19	+0,06	-0,19	+0,06
9.30	+110,114	-0,106	+86,194	-0,106	+86,040	+110,020	-0,200	+86,040	-0,260	+110,060	-0,160	+86,240	-0,060	-0,12	-0,20	-0,12	-0,20	+0,04	-0,20	+0,04
10	+110,062	-0,158	+86,200	-0,100	+86,100	+109,974	-0,286	+86,100	-0,200	+109,998	-0,222	+86,200	-0,100	-0,15	-0,23	-0,15	-0,23	-0,01	-0,23	-0,01
10.30	+109,980	-0,240	+86,202	-0,098	+86,020	+109,860	-0,360	+86,020	-0,280	+109,882	-0,238	+86,100	-0,200	-0,19	-0,29	-0,19	-0,29	-0,05	-0,29	-0,05
11	+109,916	-0,304	+86,000	-0,300	+85,794	+109,744	-0,476	+85,794	-0,506	+109,920	-0,300	+85,938	-0,362	-0,25	-0,30	-0,25	-0,30	-0,06	-0,30	-0,06
16	+109,820	-0,400	+85,800	-0,500	+85,960	+109,814	-0,406	+85,960	-0,340	+109,860	-0,360	+85,900	-0,400	-0,30	-0,25	-0,30	-0,25	-0,15	-0,25	-0,15
16.30	+109,870	-0,350	+85,740	-0,560	+85,900	+109,918	-0,302	+85,900	-0,400	+109,960	-0,260	+85,902	-0,398	-0,24	-0,26	-0,24	-0,26	-0,08	-0,26	-0,08
17	+110,020	-0,200	+85,800	-0,500	+85,962	+109,982	-0,238	+85,962	-0,338	+110,014	-0,206	+85,998	-0,302	-0,15	-0,21	-0,15	-0,21	-0,07	-0,21	-0,07
17.30	+110,074	-0,146	+86,100	-0,200	+86,100	+110,120	-0,100	+86,100	-0,200	+109,912	-0,308	+86,140	-0,160	-0,11	-0,17	-0,11	-0,17	-0,09	-0,17	-0,09
18	+110,186	-0,039	+86,338	+0,038	+86,160	+110,260	+0,040	+86,160	-0,140	+110,080	-0,140	+86,300	0	-0,08	-0,11	-0,08	-0,11	-0,10	-0,11	-0,10
18.30	+110,362	+0,142	+86,350	+0,050	+86,200	+110,320	+0,100	+86,200	-0,100	+110,258	+0,038	+86,180	-0,120	-0,04	-0,02	-0,04	-0,02	-0,05	-0,02	-0,05
19	+110,320	+0,100	+86,350	+0,050	+86,198	+110,380	+0,160	+86,198	-0,102	+110,300	+0,080	+86,140	-0,160	0	+0,15	0	+0,15	+0,02	+0,15	+0,02
19.30	+110,472	+0,252	+86,444	+0,144	+85,920	+110,444	+0,224	+85,920	-0,380	+110,420	+0,200	+86,140	-0,160	+0,07	+0,22	+0,07	+0,22	+0,15	+0,22	+0,15
20	+110,474	+0,254	+86,560	+0,260	+85,680	+110,556	+0,336	+85,680	-0,620	+110,516	+0,296	+86,100	-0,200	+0,15	+0,22	+0,15	+0,22	+0,18	+0,22	+0,18
20.30	+110,520	+0,300	+86,500	+0,200	+85,640	+110,560	+0,340	+85,640	-0,660	+110,520	+0,300	+85,954	-0,346	+0,20	+0,25	+0,20	+0,25	-0,20	+0,25	-0,20
21	+110,420	+0,200	+86,400	+0,100	+86,160	+110,340	+0,120	+86,160	-0,140	+110,460	+0,240	+86,190	-0,110	+0,18	+0,20	+0,18	+0,20	-0,17	+0,20	-0,17
21.30	+110,360	+0,140	+86,500	+0,200	+86,140	+110,400	+0,180	+86,140	-0,160	+110,460	+0,240	+86,190	-0,110	+0,15	+0,18	+0,15	+0,18	—	+0,18	—

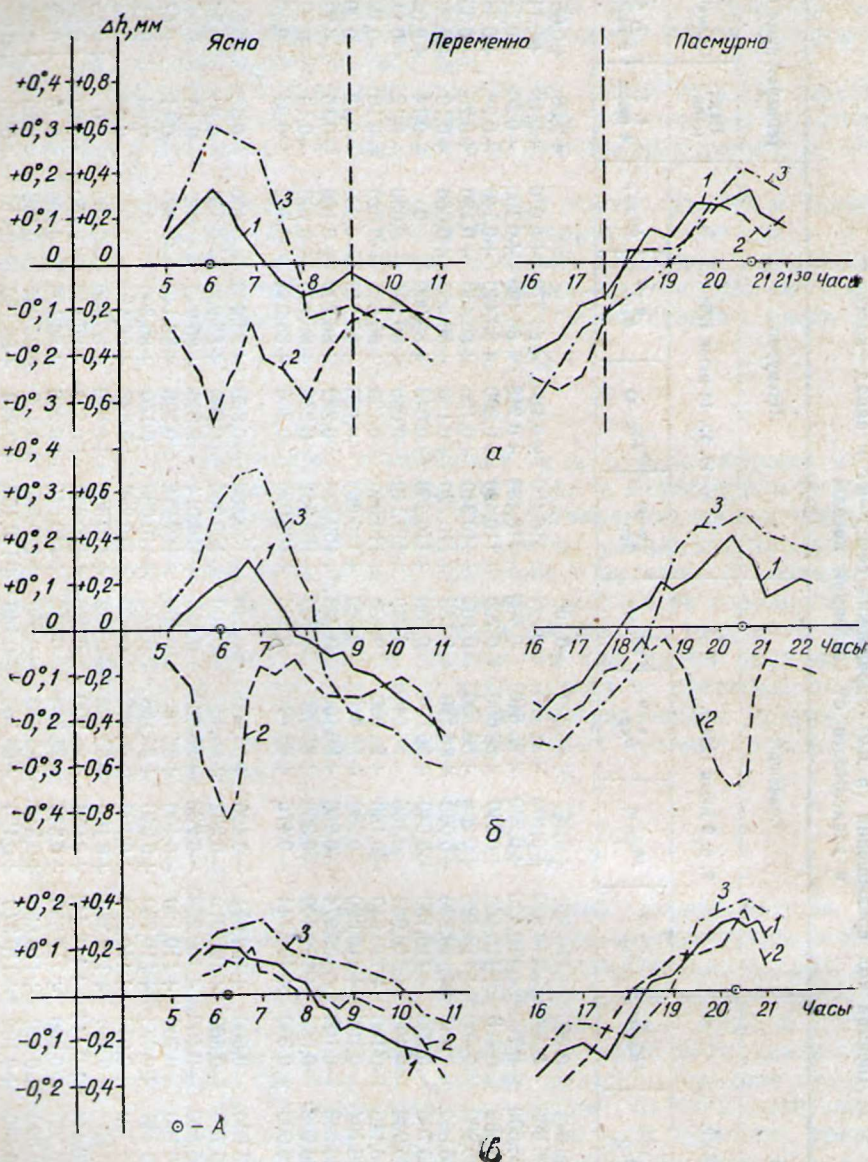


Рис. 1. Суммарные графики изменений превышений направлений север—юг и запад—восток, а также средних температурных градиентов при разных условиях.

а — переменно, слабый ветер, б — солнечно, слабый ветер, в — пасмурно, тихо;
 1 — изменения превышений направлений север—юг $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{с-ю}}$; 2 — изменение превыше-
 ний направлений запад—восток $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{з-в}}$; 3 — температурные градиенты Δt ; А — момент
 восхода и захода Солнца.

На графике (в) и второй половине графика (а), когда наблюдения велись в пасмурную погоду, изменения обеих превышений $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{с-ю}}$ и $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{з-в}}$ невелики и почти совпадают с ходом температурных градиентов.

Иная картина в солнечную погоду. На графике (б) и первой половине графика (а) видно, что на превышение запад—восток в периоды восхода и захода Солнца оказывается такое сильное влияние нерелракционных ошибок, что ход $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{з-в}}$ становится совсем проти-

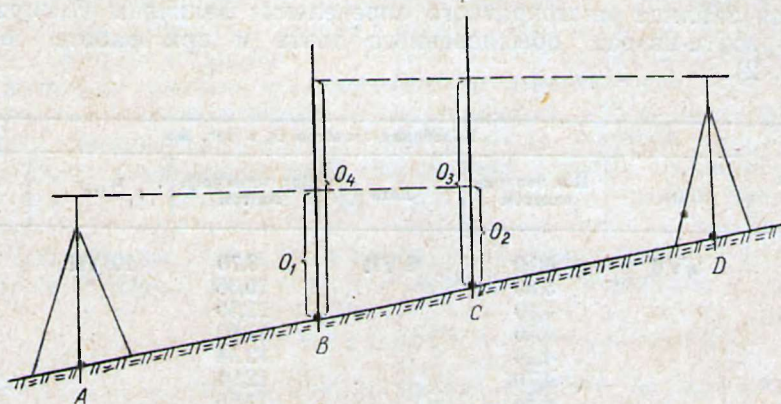


Рис. 2. Схема к определению угла i нивелира.

воположным ходу соответствующих температурных градиентов. Но ведь действие рефракции на это превышение должно оставаться, так как в эти периоды имеют место самые максимальные температурные градиенты и кривая $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{с-ю}}$ подтверждает это, поскольку продолжает следовать за кривой Δt , хотя, правда, и не совсем с ней совпадает.

Если бы на превышения $h_{\text{с-ю}}$ и $h_{\text{з-в}}$ влияли только ошибки рефракции, то обе кривые $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{с-ю}}$ и $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{з-в}}$ довольно хорошо совпадали бы между собой и с кривой Δt , что и бывает в пасмурную погоду.

В солнечную же погоду положение кривой $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{з-в}}$ влиянием неодинаковой освещенности реек в периоды 5 час 30 мин—6 час 30 мин и 19 час 30 мин—20 час 30 мин отбрасывается из положения $+0,5$ мм в положение $-0,5$ мм, то есть на 1 мм, что надо полагать и составляет полную ошибку в $h_{\text{з-в}}$ от влияния этого источника. Положения кривой $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{с-ю}}$ отбрасывается из положения $+0,5$ мм в положение $+0,3$ —на 0,2 мм.

Влияние ошибок односторонних температурных воздействий на нивелир при нашей методике исследований было сведено к минимуму. Оборудованный в виде плотного навеса зонт, программа наблюдений, не допускавшая задержки трубы в одном положении более чем на 15 сек, и установка нивелира уровнем в сторону, противоположную к Солнцу, во время ожиданий при переходе от приема к приему хорошо способствовали равномерному распределению тепла на все части нивелира. Кроме того, в каждом приеме прокладывался прямой и обратный ход, из которых брались средние значения превышений.

Эффективность защиты нивелира зонтом-навесом проверялась нами путем многократного определения угла i нивелира. Делалось это таким образом: линия длиной 80 м делилась на три отрезка 30, 20 и 30 метров, в точках A, B, C и D (рис. 2) устанавливались деревянные столбы, в которые забивались колышки. Над точкой A ставился в рабочее положение нивелир и брались отсчеты O_1 и O_2 по рейке, уста-

новленной сначала в точке *B*, а затем в точке *C*. После этого нивелир переносился в точку *D* и брались отсчеты O_3 и O_4 по рейке в точках *B* и *C*. В случае отсутствия угла *i*

$$O_4 = O_1 + (O_3 - O_2).$$

В случае наличия, но постоянства угла *i* величина O_4 из нескольких определений должна быть постоянной или во всяком случае колебаться в пределах двойной ошибки работы на станции (1 мм). Ниже приводится таблица многократного определения величины O_4 при применении зонта-навеса, обыкновенного зонта и при работе без зонта (табл. 2).

Таблица 2

Время	Колебания отсчетов O_4 в пог. мм					
	Дата	Под зонтом-навесом	Дата	Под топограф. зонтом	Дата	Без зонта
5.30	5/VII	4,10	6/VII	8,70	10/VII	10,42
6.00		5,56		10,36		14,54
6.30		4,00		11,50		6,38
7.00		4,50		11,92		7,84
7.30		4,14		12,44		12,62
8.00		4,70		12,94		13,18
8.30		4,54		11,66		5,32
9.00		5,17		12,02		10,10
9.30		5,60		13,58		13,60
16.30		6,14		14,84		17,48
17.00		5,72		13,14		15,00
17.30		5,38		14,00		16,84
18.00		4,84		13,78		10,50
18.30		4,62		13,16		15,26
19.00		5,16		12,92		12,84
19.30		4,44		13,04		13,94
20.00		4,08		13,46		8,32
20.30		4,32		12,50		8,80
21.00		4,20		10,18		6,76

Все три дня, в которые производились данные исследования, была сухая солнечная слабоветренная погода.

Из всего сказанного выше можно сделать такие выводы:

1. Ошибка от неодинаковой освещенности реек в случаях, когда при работе не исключаются периоды восхода и захода Солнца, в ясные дни может доходить до 1 мм на станции.

2. Превышения линий нивелирования, расположенных вдоль параллелей, искажаются этими ошибками в 3—4 раза больше, чем превышения меридиальных направлений.

3. Периоды самых больших искажений для широт 49—50° лежат в пределах: утром 0,1 часа до восхода Солнца и 1,0 часа после восхода, вечером 1,5 часа до захода и 0,1 часа после захода Солнца.

4. Ошибки при работе в утренние часы не компенсируются ошибками в вечерние часы, а, наоборот, удваиваются.

5. Чтобы избежать больших ошибок от неодинаковой освещенности, нужно точно и неукоснительно исполнять требования § 74 «Инструкции по нивелированию I, II, III и IV классов» (издание 1963 г.) и даже еще расширить периоды времени, в которые запрещается производить нивелирование, а именно: утром начинать работу через 1 час после восхода, а вечером кончать за 1,5 часа перед заходом Солнца.

Для увеличения продвига лучше продлить периоды наблюдений за счет поздних утренних и ранних вечерних часов до тех пор, пока не

начнутся утром и как только закончатся вечером значительные колебательные движения восходящих токов.

При устойчивой сухой, даже жаркой погоде, а тем более в пасмурную, восходящие токи начинаются довольно поздно и рано кочкаются.

Например, в Крыму период спокойных изображений в июне, июле и августе продолжается утром до 10—11 часов, а вечером начинается с 16—17 часов.

В широтах выше 50° , где светлые периоды до восхода и после захода Солнца довольно велики, можно использовать для работы время 1—0,5 часа до восхода и столько же после захода Солнца.

6. Влиянием ошибок от неодинаковой освещенности реек можно вполне объяснить закономерность, замеченную в 1960 г. немецкими [5], а в 1963 г. латвийскими геодезистами [3], когда в нивелирных линиях, направленных вдоль параллелей, получались гораздо большие расхождения прямых и обратных ходов, чем в линиях меридиального направления.

Систематические части ошибок на 1 км хода в первых условиях также были больше в 2—3 раза, чем во вторых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изотов А. А. Одиннадцатая Генеральная ассамблея Международной ассоциации геодезии. «Геодезия и картография», 1958, № 4.

2. Резолюции, принятые Международной ассоциацией геодезии на XI Генеральной ассамблее в Торонто 3—14 сентября 1957 г. «Геодезия и картография», 1958, № 5.

3. Современные движения земной коры. Сборник № 2. АН ЭССР, Тарту, 1965.

4. Энтин И. И. Высокоточное нивелирование. Труды ЦНИИГАиК, вып. 111. Геодезиздат, М., 1956.

5. Gronwald W. Zur Herleitung des mittleren Fehlers m , für das Feinnivellement von 1 km. Doppelmessung «Z. Vermessungswesen», 85, № 5, 1960.

Работа поступила
12 декабря 1967 г.