

И. Н. КМЕТКО

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОДНОСТОРОННИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

При одностороннем температурном воздействии на нивелир (вызываемом обычно расположением Солнца со стороны окуляра либо со стороны объектива) пузыrek уровня движется в сторону этого воздействия, а при установке его в нульpunkt отсчет по рейке становится ошибочным. Данное обстоятельство и вызывает в нивелирных ходах с направлением вдоль параллели большие искажения, чем в ходах, расположенных вдоль меридиана.

Это отмечалось учеными уже около 80 лет назад, однако лишь немногими учеными в последние 20 лет выполнены специальные исследования. Заметим также, что авторы называют различные количественные значения ошибок в результатах нивелирования, вызываемых указанной причиной.

В задачи наших исследований температурных влияний на нивелир входило:

а) проверить полученную в 1964 г. при исследованиях нивелирной рефракции разность утренних и вечерних превышений на станции по линии запад—восток [1, табл. 1, стр. 40]. Разность превышений в 0,1 мм можно объяснить расположением Солнца по отношению к линии нивелирования в утренние и вечерние видимости, так как ошибки в превышениях, полученные на этой основе, полностью ей соответствуют;

б) изучить односторонние температурные влияния на нивелир в течение утренней и вечерней видимости, а также на протяжении целого дня и определить вызванные ими количественные значения ошибок превышений на станции. Изучить на этой основе наиболее выгодные условия проложения нивелирных ходов в зависимости от их ориентировки (направления);

в) разграничить указанные ошибки от ошибок, вызываемых рефракцией при различных условиях на трассах нивелирования (уклоны местности, погода, время наблюдений, ориентировка ходов), а также изучить совместное их действие. Действия этих двух ошибок в ходах будут зачастую накладываться.

Исследования выполнялись как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Во время опытов использовались нивелир НА-1 № 00496, инварные рейки, психрометры Асмана и другие метеоприборы, а также сконструированный нами прибор для измерения разностей температуры на концах ампулы цилиндрического уровня. Последний представляет собой дифференциальную батарею термопар (железо—константан),

соединенную с высокочувствительным оптическим гальванометром. Прибор испытывался на специальной установке, и цена одного деления шкалы гальванометра оказалась равной $0,03^{\circ}\text{C}$. Батареи термопар были примонтированы к концам ампулы цилиндрического уровня нивелира для измерения разности температуры на ней (Δt_{up}) с целью изучения ошибки в отсчете по рейке при одностороннем температурном воздействии на нивелир.

Нивелир и рейки тщательно исследовались. Среднее значение угла $i = -2'',7$. Цена одного деления уровня равна $4'',0$ (0,8 мм). До начала и в конце работы рейки подвергались специальному компарированию, в процессе которого находились поправки ко всем рабочим штрихам реек. Подробно этот вопрос рассмотрен в работе [1].

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты выполнялись в лаборатории Львовского политехнического института. Нивелир устанавливался на штативе, а в 50 м от него на башмаке устанавливается инварная рейка. Односторонние тем-

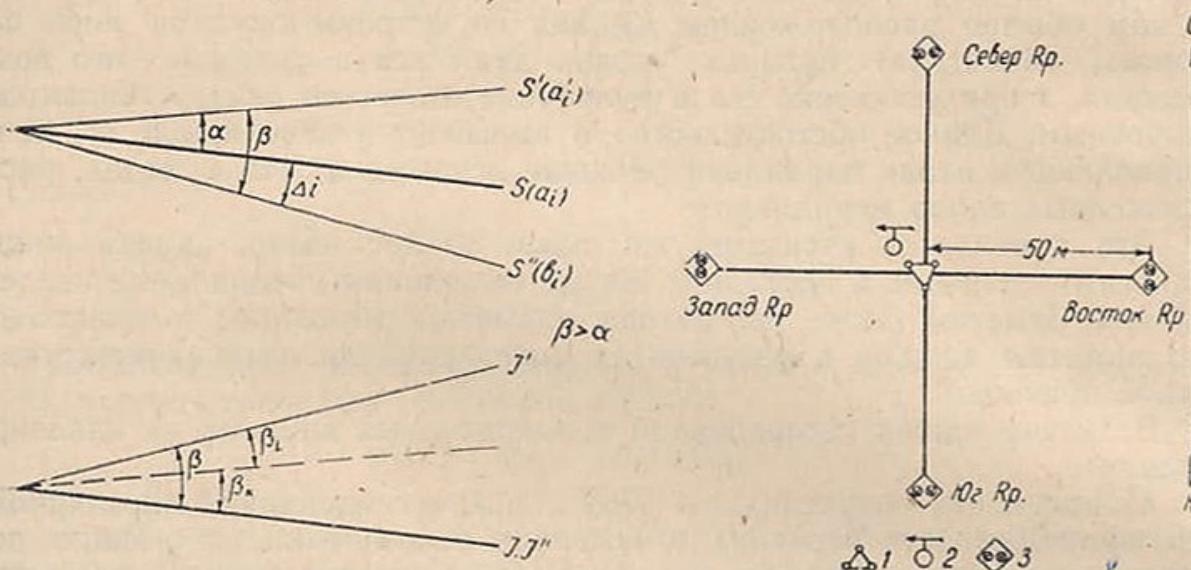


Рис. 1. Взаимосвязь между осью уровня I и визирной осью S в процессе эксперимента.

Рис. 2. Схема расположения реперов.

пературные влияния на нивелир получали при помощи экранированной электрической лампы (150 вт), расположенной на специальном держателе на расстоянии 40—50 см от нивелира либо со стороны окуляра, либо со стороны объектива.

Каждый прием наблюдений состоял из следующих операций:

- отсчеты времени, отсчеты по гальванометру, отсчеты по рейке (a_i) при пузырьке уровня в нульпункте;
- спустя 2 мин после начала приема брались отсчеты времени, отсчеты гальванометра, отсчет количества делений уровня, на которое сместился пузырек, отсчет по рейке при пузырьке уровня не в нульпункте (a'_i);
- приводился пузырек уровня в нульпункт и производились отсчеты по рейке при пузырьке уровня в нульпункте (b_i), отсчет гальванометра, отсчет времени и т. д.

Выполнялись серии приемов при температурном воздействии на нивелир либо со стороны окуляра, либо со стороны объектива. Исследования длились четыре дня.

Проследим, как изменяется угол между визирной осью и осью уровня. Пусть в исходном положении (рис. 1) визирная ось трубы S была горизонтальна и параллельна оси уровня I (угол $i=0$). При одностороннем температурном влиянии (в данном случае со стороны объектива) визирная ось займет новое положение, отличное от начального на угол α ; в результате отсчет по рейке a_i изменится и станет равным a'_i . Угол α может быть определен по разности отсчетов a_i и a'_i . Ось уровня при этом также изменила свое положение на угол β , ибо пузырек переместился в сторону большей температуры. Причем угол β существенно больше α и состоит из двух частей:

$$\beta = \beta_k + \beta_L, \quad (1)$$

где β_k — перемещение пузырька за счет одностороннего нагрева самого нивелира в целом;

β_L — перемещение за счет движения пузырька уровня от одностороннего нагрева жидкости в ампуле.

Заметим, что коэффициент теплового расширения жидкости, заполняющей ампулу уровня, примерно на два порядка больше коэффициента для стекла.

Если пузырек уровня снова привести в нульpunkt, отсчет по рейке (b_i) становится существенно меньшим первоначального. Аналогично угол β определяется по разности отсчетов a_i и b_i . Разность $\beta - \alpha = \Delta i$ дает изменение угла i . Величина Δi может быть найдена по разностям отсчетов a_i и b_i .

При температурном воздействии на нивелир со стороны окуляра отсчеты имеют противоположный ход.

Средняя величина ошибки в отсчете по рейке при наличии разности температуры на ампуле уровня в $0,1^{\circ}\text{C}$ равна $0,80 \text{ мм}$ при длине плеча 50 м . Эта ошибка связана, во-первых, с перемещением пузырька уровня на счет одностороннего нагрева частей нивелира вообще (в том числе оправы уровня) и, во-вторых, с движением пузырька уровня в сторону большей температуры при одностороннем тепловом влиянии.

Замечено, что при одинаковой интенсивности и продолжительности одностороннего нагрева разность температуры на концах ампулы уровня существенно зависит от положения зеркальца (иллюминатора) для освещения уровня. Зеркальная поверхность иллюминатора является как бы рефлектором, направляющим тепловую энергию на ампулу уровня. Однако искусственные односторонние нагревы нивелира в наших исследованиях во много раз больше естественных, поэтому лабораторные исследования не исчерпывают вопроса о температурных влияниях на результаты нивелирования в производственных условиях.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью изучения ошибки в превышении на станции за счет фактических температурных влияний на нивелир летом 1966 г. были выполнены полевые исследования при различной ориентировке ходов, в солнечную и пасмурную погоду.

Постановка и методика исследований. Было намечено непрерывное измерение превышений в утренние и вечерние видимости по линиям юг—север и запад—восток (рис. 2) с совместным измерением разности температуры на концах ампулы цилиндрического уровня при каждом повороте трубы на заднюю и переднюю рейки, а также вертикальных градиентов температуры в приземном слое воздуха и других метеорологических элементов.

Полигон для исследований (рис. 2) был оборудован на большом открытом выгоне, как описано в работе [1], лишь с некоторыми особенностями, а именно:

- а) обе линии — юг—север, запад—восток — были горизонтальны и строго ориентированы;
- б) в программу наблюдений были включены также измерения $\Delta t_{\text{уп}}$;
- в) измерения превышений выполнялись лишь длинными лучами (50 м). Нивелир защищался от Солнца зонтом.

Порядок наблюдений был следующий:

измерения метеорологических элементов; нивелирование по линии юг—север в четыре полуприема — два по правой и два по левой линиям нивелирования. Время фиксировалось в начале и в конце каждого полуприема. Отсчеты по гальванометру брались дважды при каждом отсчете по рейкам (до и после отсчета); измерения метеоэлементов; геодезические наблюдения по линии запад—восток; метеорологические наблюдения и т. д.

Подробно программа наблюдений на станции рассмотрена при описании аналогичных исследований [1].

Наблюдения выполнялись при спокойных и слегка колеблющихся изображениях и скорости ветра, не превышающей 4 м/сек. Опыты продолжались 15 дней (2. VII 1966 г. — 16. VII 1966 г.), из них девять дней были солнечными, остальные — пасмурными. В течение двух солнечных дней проводились наблюдения на протяжении всего светлого времени. Было выполнено 872 определения превышений по линии юг—север и 848 — по линии запад—восток.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

При работе на станции в утренние и вечерние видимости обнаружены весьма закономерный ход разностей температуры на концах ампулы цилиндрического уровня, получаемых в течение небольших проме-

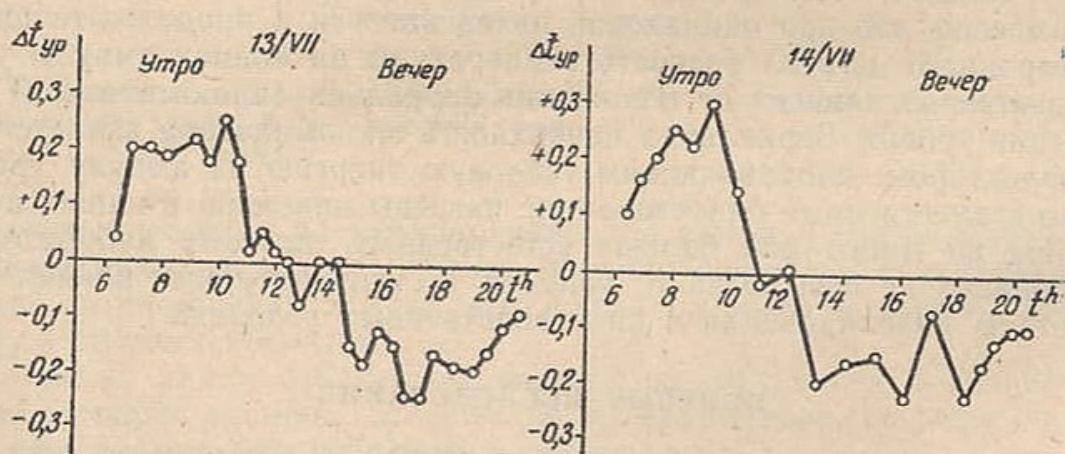


Рис. 3. Изменение $\Delta t_{\text{уп}}$ в течение дня по линии запад—восток.

жутков времени между поворотами трубы нивелира на заднюю и переднюю рейки. Разности температуры вычислялись по формуле

$$\Delta t_{\text{уп}} = \Delta t_{16} - \Delta t_{15}, \quad (3)$$

где Δt_{16} — разница температуры на концах уровня при наблюдении рейки № 16 (задняя рейка);
 Δt_{15} — то же, при наблюдении рейки № 15 (передняя рейка);
 Δt_{16} и Δt_{15} — фиксировались гальванометром.

Для линии запад—восток утром $\Delta t_{\text{уп}}$ имеет знак плюс, а вечером — минус. Знак изменяется посередине дня. На графиках (рис. 3) показаны изменения $\Delta t_{\text{уп}}$ в делениях шкалы гальванометра при нивелировании по названной линии на протяжении двух дней.

Максимальные разности бывают при расположении Солнца в вертикальной плоскости, проходящей через визирную ось трубы нивелира,

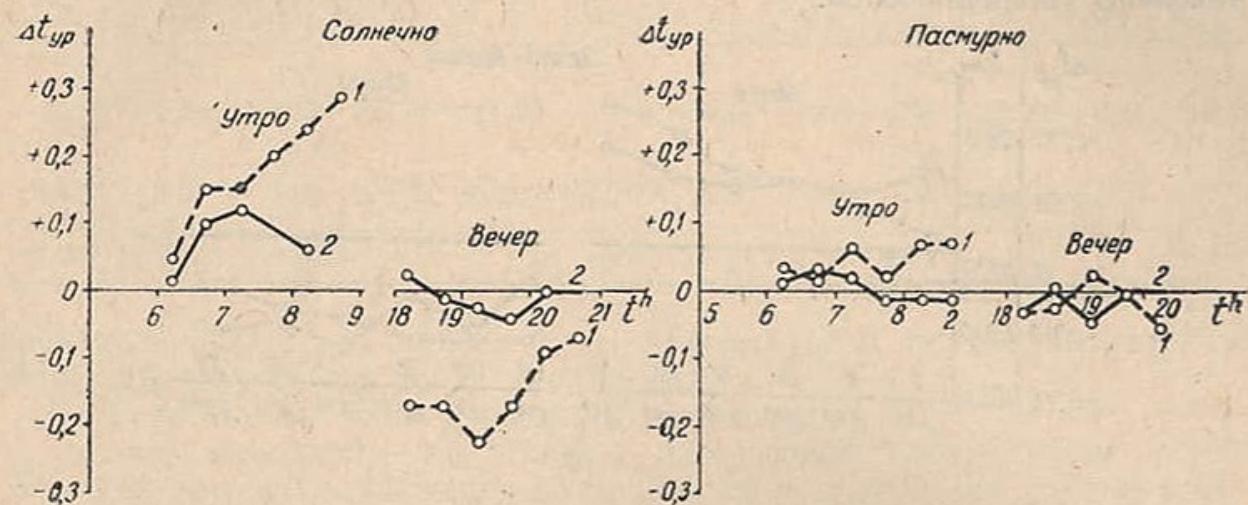


Рис. 4. Изменение $\Delta t_{\text{уп}}$ в утренние и вечерние видимости (по осредненным данным):
1 — $\Delta t_{\text{уп}}$ по линии запад—восток; 2 — $\Delta t_{\text{уп}}$ по линии юг—север.

и наоборот, если Солнце расположено в плоскости меридиана, они равны нулю. Если Солнце светит сквозь тучи, $\Delta t_{\text{уп}}$ сразу же уменьшаются;

Таблица 1

Средние измеренные превышения и $\Delta t_{\text{уп}}$, выведенные по данным серий

№ серии	Запад—восток			№ серии	Юг—север				
	Среднее время серии	h	M_h		Среднее время серии	h	M_h		
I	6 ^h 20 ^m	128,65	$\pm 0,05$	+0 ^o ,04	I	6 ^h 00 ^m	20,08	$\pm 0,09$	+0 ^o ,01
II	6 46	61	$\pm 0,06$	+0,08	II	6 38	16	$\pm 0,04$	+0,06
III	7 20	63	$\pm 0,05$	+0,10	III	7 05	14	$\pm 0,03$	+0,07
IV	7 46	62	$\pm 0,02$	+0,11	IV	7 34	15	$\pm 0,04$	+0,04
V	8 20	64	$\pm 0,05$	+0,16	V	8 08	15	$\pm 0,03$	+0,02
VI	8 48	68	$\pm 0,09$	+0,18	VI	8 33	22	$\pm 0,06$	+0,00
Cр.		128,64	$\pm 0,01$	+0,11	Cр.		20,15	$\pm 0,02$	+0,03
VII	18 ^h 04 ^m	128,49	$\pm 0,06$	-0 ^o ,10	VII	17 ^h 45 ^m	20,21	$\pm 0,03$	0 ^o ,00
VIII	18 44	39	$\pm 0,05$	-0,10	VIII	18 20	15	$\pm 0,03$	0,00
IX	19 20	44	$\pm 0,04$	-0,10	IX	19 01	07	$\pm 0,07$	-0,03
X	19 48	36	$\pm 0,07$	-0,08	X	19 25	12	$\pm 0,04$	-0,02
XI	20 15	40	$\pm 0,05$	-0,07	XI	19 59	10	$\pm 0,06$	0,00
XII	20 49	38	$\pm 0,05$	-0,04	XII	20 36	15	$\pm 0,15$	0,00
Cр.		128,41	$\pm 0,02$	-0,08	Cр.		20,13	$\pm 0,02$	-0,01
Разность ут- ренних и ве- черних зна- чений		+0,23		-0,19		+0,02		+0,04	

Примечание. M_h — средние квадратические ошибки превышений.

когда же Солнце полностью скрыто, $\Delta t_{\text{ур}}$ становятся близкими к нулю. Это доказывает, что пузырек уровня движется к Солнцу за счет разности температуры на его концах, а не за счет каких-либо других сил. Чем медленнее будет производиться работа на станции, тем большими будут значения $\Delta t_{\text{ур}}$. Для эксперимента мы пытались некоторое время вести наблюдения без зонта. Отсчеты по гальванометру сразу же значительно увеличиваются.

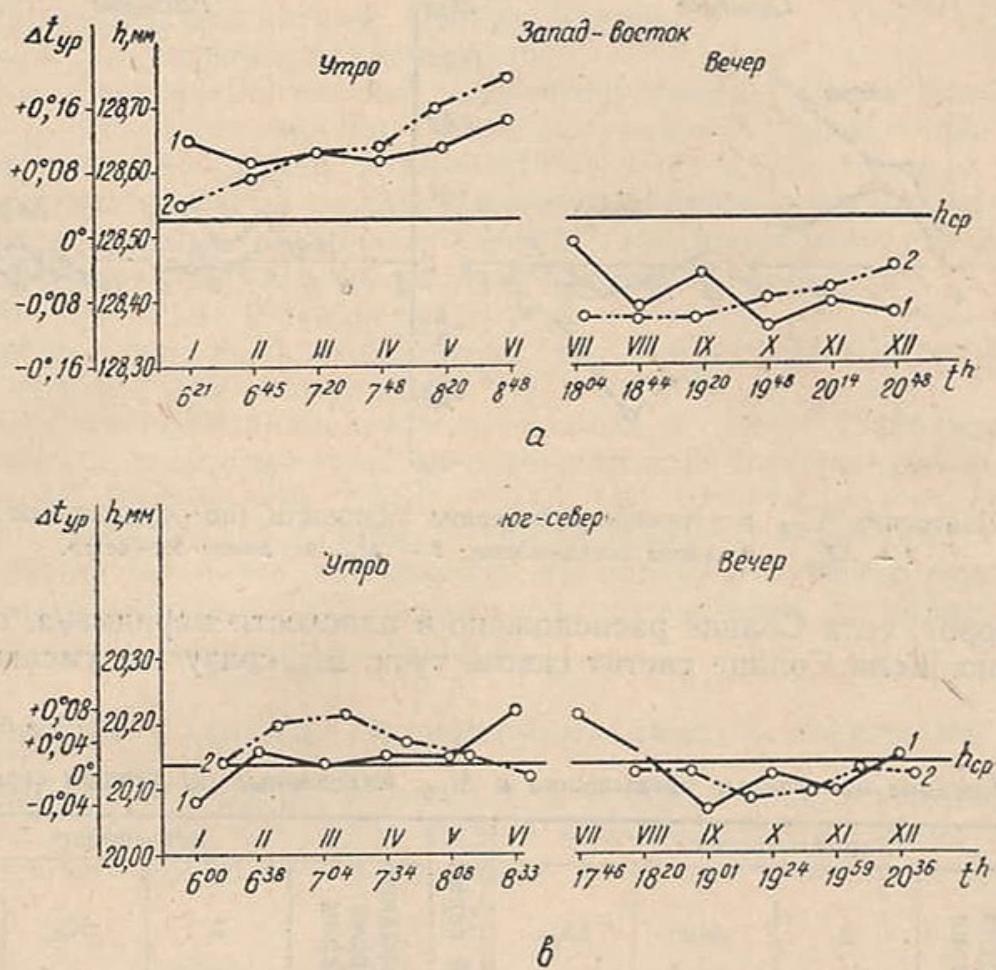


Рис. 5. Графики измеренных превышений и $\Delta t_{\text{ур}}$:
1 — измеренные превышения (средние за 14 дней); 2 — средние разности температуры на концах ампулы цилиндрического уровня; $h_{\text{ср}}$ — средние превышения.

На рис. 4 показаны изменения значений $\Delta t_{\text{ур}}$ в утренние и вечерние видимости по двум линиям. Графики составлены по осредненным данным.

При обработке полевого материала наблюдения были сгруппированы по линиям юг—север и запад—восток. Вычислены средние значения измеренных превышений h из левой и правой линий нивелирования (предварительно получены средние значения h в приемах), средние значения разностей $\Delta t_{\text{ур}}$ и моментов времени. Далее образовано шесть утренних и шесть вечерних серий. Каждая серия включает наблюдения h и $\Delta t_{\text{ур}}$, выполненные примерно за полчасовые отрезки одного и того же времени за все дни наблюдений.

В табл. 1 приведены средние данные по сериям. Как видно, по линии запад—восток утренние превышения на 0,23 мм больше вечерних при существенных, противоположных по знакам, разницах утренних и вечерних $\Delta t_{\text{ур}}$. По линии юг—север такое явление не наблюдается. Отсюда вывод: измеренное превышение на станции существенно искажается ошибкой, которая вызвана односторонним температурным влия-

Средние значения h и $\Delta t_{\text{ур}}$, полученные за девять солнечных и шесть пасмурных дней

Запад—восток						Юг—север					
Солнечно			Пасмурно			Солнечно			Пасмурно		
h	M_h	$\Delta t_{\text{ур}}$	h	M_h	$\Delta t_{\text{ур}}$	h	M_h	$\Delta t_{\text{ур}}$	h	M_h	$\Delta t_{\text{ур}}$
Утро						Утро					
128,65	0,00	+0,18	128,61	$\pm 0,01$	+0,04	20,11	$\pm 0,01$	+0,08	20,20	$\pm 0,01$	+0,00
Вечер						Вечер					
128,36	$\pm 0,03$	$\pm 0,15$	128,56	$\pm 0,02$	-0,02	20,11	$\pm 0,03$	-0,01	20,23	$\pm 0,04$	-0,01
+0,29			+0,33	+0,05		+0,06	0,00		+0,09	-0,03	+0,01

нием на нивелир. Эта ошибка будет максимальной при направленности линии нивелирования вдоль параллели.

На основании табл. 1 построен график (рис. 5).

Далее выполнены вычисления, аналогичные предыдущим, с той разницей, что все наблюдения разделены примерно на две группы в зависимости от погоды — солнечной или пасмурной. В табл. 2 приведены средние значения рассматриваемых величин по двум линиям нивелирования. Данные таблицы более наглядно подтверждают сделанные ранее заключения. Заметим, что в пасмурную погоду разница в утренних и вечерних превышениях и $\Delta t_{\text{ур}}$ значительно уменьшается. Как по линии запад—восток при полной облачности, так и по линии юг—север при любой погоде эти различия практически малоощутимы. Следует отметить также, что превышения, измеренные в пасмурную погоду, по абсолютной величине в среднем на 0,1 ми больше превышений, полученных в солнечную погоду. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

Отдельно отметим, что превышения по линии запад—восток и юг—север не имеют определенного хода в течение утренних и вечерних видимостей, несмотря на закономерные изменения в эти периоды вертикальных градиентов температуры в трехметровом приземном слое воздуха. Это объясняется горизонтальностью обеих линий и еще раз подтверждает выводы, сделанные в работе [1] относительно нивелирной рефракции. Вертикальные градиенты температуры изменяют свои значения от положительных к отрицательным в утренние видимости, переходя через нуль во время изотермии, в вечерние же видимости наблюдается обратное явление.

Рассмотрим, как влияют на превышения в ходах нивелирования односторонние температурные воздействия на нивелир.

1. Пусть при солнечной погоде прямое и обратное нивелирование в ходе по линии запад—восток выполнено в утреннюю (вечернюю) видимость, т. е. в прямом (обратном) ходе нивелирование велось навстречу Солнцу, а в обратном (прямом) ходе — от Солнца. В этом случае ошибки, вызываемые односторонними температурными влияниями, не будут компенсироваться.

2. Если прямое нивелирование в ходе выполнено в утреннюю (вечернюю) видимость, а обратное — в вечернюю (утреннюю) видимость, т. е. и в прямом и в обратном ходах нивелирование велось навстречу Солнцу, тогда в среднем превышение из прямого и обратного ходов рассматриваемая погрешность компенсируется. Поэтому, если прямой ход выполнен утром (вечером), то обратный ход должен выполняться вечером (утром). Если же часть прямого (обратного) хода выполнена

в одну видимость, а часть — в другую, то такие же части обратного (прямого) хода также должны быть выполнены соответственно в различные видимости.

ВЫВОДЫ

1. В солнечную погоду односторонние температурные влияния на нивелир вызывают существенную ошибку в измеренном превышении, которая может дать систематическую разность утренних и вечерних превышений на станции до 0,30 мм при направленности линии нивелирования запад—восток. Ошибка же в превышении при этом будет до 0,15 мм. Если нивелирный ход ориентирован вдоль параллели и проложен в одно и то же время дня в прямом и обратном направлениях, то суммарное превышение в ходе будет искажено на 1,5 мм/м. В пасмурную погоду не следует ожидать сколько-нибудь значительных ошибок, вызываемых рассматриваемой причиной. Отметим, что величина 0,30 мм, полученная из экспериментов, несколько занижена, так как мы не производили отсчетов по дальномерным нитям, и, следовательно, наше время наблюдений по рейкам меньше нормального затрачиваемого при выполнении нивелирования I класса.

2. Доказательством того, что эти систематические погрешности превышений обусловлены именно односторонними температурными влияниями на нивелир, является хорошая согласованность между ходом превышений и разностью температуры на концах ампулы уровня.

3. Особенно внимательно следует относиться к нивелирным ходам, направленным вдоль параллели и имеющим уклон, так как в этом случае на измеренное превышение будут действовать систематические ошибки, вызываемые совместным действием односторонних температурных влияний и рефракции. Суммарная систематическая ошибка в превышении на станции в самом неблагоприятном случае может достигать 0,45 мм.

4. При конструировании нивелиров желательно было бы подсвет уровня делать более закрытым способом (как это делается, например, при подсвечивании лимбов в оптических теодолитах).

5. Изучение в отдельности ошибок нивелирования, вызываемых рефракцией [1], и ошибок, вызываемых температурными влияниями на нивелир, дает возможность раздельно анализировать их влияние в нивелирных ходах.

ЛИТЕРАТУРА

Кметко И. Н. Исследования действия рефракций в высокоточном нивелировании. В сб. «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», вып. 3. Изд-во Львов. ун-та, 1965.

Работа поступила
12 апреля 1968 г.