

И. Н. КМЕТКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ РЕФРАКЦИИ В ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

### Постановка вопроса

В работе [1], анализируя исследования ЦНИИГАиК, выполненные под руководством И. И. Энтина, ее авторы пришли к заключению о том, что в настоящее время нет оснований считать влияние рефракции в высокоточном нивелировании случайным. Чтобы окончательно выяснить характер этого влияния, летом 1964 г. нами были поставлены экспериментальные полевые исследования, которые выполнялись научной геодезической экспедицией Львовского политехнического института под руководством А. Л. Островского на полигоне Лаборатории физики приземного слоя атмосферы Украинского научно-исследовательского гидро-метеорологического института.

В задачи исследований входило: 1) метеорологические исследования приземного трехметрового слоя атмосферы; 2) изучение характера действия рефракции на высокоточное нивелирование; 3) количественная оценка ошибки за рефракцию при различных вертикальных градиентах температуры; 4) разработка рекомендаций по освобождению результатов нивелирования от ошибок рефракционного происхождения.

### Производство исследований

Методика исследований действия рефракции в геометрическом нивелировании наиболее детально разработана И. И. Энтиным [3]. Для определения ошибки за рефракцию применялся метод нивелирования одних и тех же точек длинными и короткими лучами. Однако методика наших исследований существенно отличается от данной, а именно: 1) измерения температуры велись приборами, которые давали средние слаженные температурные градиенты, а, между тем, действие рефракции подчиняется именно этим градиентам; 2) были предусмотрены все предосторожности, чтобы исключить оседание реперов во время исследований; 3) нивелирование длинным лучом на наклонных и горизонтальных участках выполнялось одновременно и над одинаковыми подстилающими поверхностями; 4) нивелирование велось по четырем костылям, т. е. методика экспериментов соответствовала методике нивелирования I класса; 5) компарировались все рабочие штрихи реек и вводились поправки в отсчеты за компарирование штрихов; 6) применялся один и тот же нивелир для нивелирования длинными и короткими лучами.

Те и прочие меры дали возможность свести к минимуму другие возможные систематические влияния в процессе исследований.

Экспериментальные исследования выполнялись на открытой, слегка всхолмленной местности в южном районе УССР на довольно большом по площади выгоне, свободном от каких-либо аномальных температурных полей. Схематический план участка показан на рис. 1.

На указанном полигоне заложено четыре грунтовых репера с двумя марками (для образования левой и правой линий нивелирования): два по линии юг—север на расстоянии 100 м друг от друга и два по линии запад—восток на таком же расстоянии. Превышение между южным и северным реперами равнялось 1,75 м, а линия между западным и восточным реперами имела нулевой уклон.

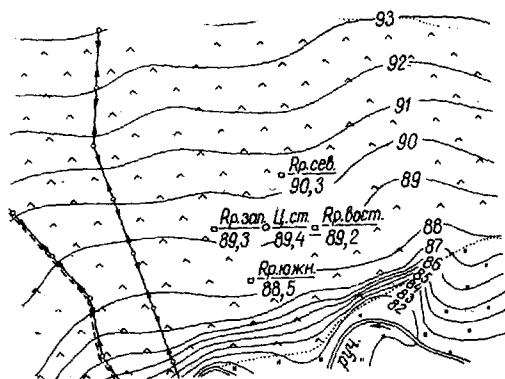


Рис. 1. Схематический план участка.

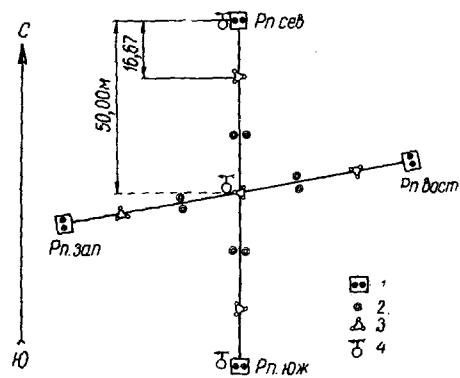


Рис. 2. Схема расположения реперов и станций.

1 — грунтовые реперы с двойными нивелирными марками; 2 — нивелирные костили; 3 — нивелирные станции; 4 — метеорологические станции.

Исследования предусматривали совместные метеорологические и геодезические наблюдения. Метеорологические наблюдения велись на специально оборудованных трех метеостанциях: у южного репера, на центральной станции, и у северного репера. На двух крайних станциях измерялись температура и влажность на высотах 0,5 и 2,5 м, на центральной станции — на высотах 0,5, 1,6 и 2,5 м. Кроме того, измерялись скорость ветра и давление, а также фиксировались погода, колебания изображений и время восхода и заката солнца.

Геодезическими наблюдениями для определения ошибки, вызываемой рефракцией, предусматривалось нивелирование по указанным линиям из центральной станции длинными лучами (50 м) и короткими (16,67 м) из трех станций. Как видно из схемы расположения реперов, костилей и станций (рис. 2), нивелирование наклонного и горизонтального участков выполнялось на одном и том же месте, а также примерно в одно и то же время, так как приемы нивелирования наклонного участка чередовались с приемами нивелирования горизонтального участка.

Для вертикальной установки реек над костилями и над реперами было построено восемь специальных станков. Штатив нивелира на всех станциях устанавливался на вкопанные колья длиной 0,5 м и диаметром 20—25 см. Нивелир в процессе работы защищался от солнца топографическим зонтом, а при переноске со станции на станцию — белым чехлом.

Вся методика геодезических наблюдений была приближена к методике выполнения нивелирования I класса.

При выполнении исследований применялись следующие инструменты и приборы: нивелир НА-1, штриховые инвариные рейки, психрометры Асмана, ручной анемометр, барометр-анероид и др. Нивелир исследовался в соответствии с существующими требованиями. Инвариные рейки до и в конце работ подвергались специальному компарированию.

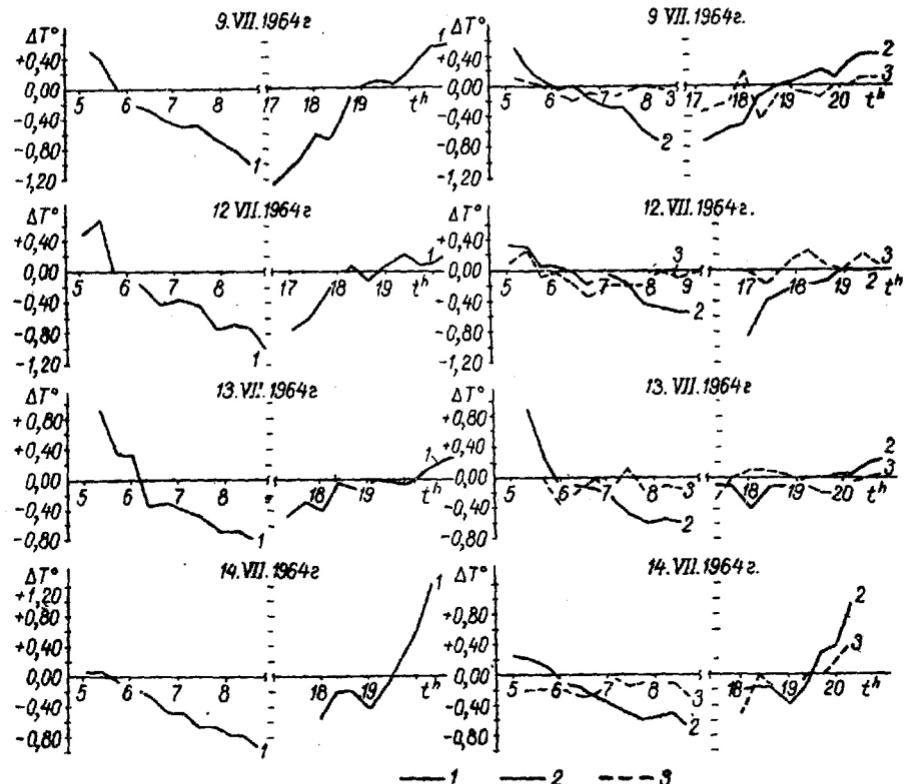


Рис. 3. Изменение  $\Delta T^\circ$ ,  $\Delta T_H^\circ$  и  $\Delta T_B^\circ$  в зависимости от времени в периоды утренней и вечерней видимостей за четыре отдельные даты.

1 —  $\Delta T^\circ$ ; 2 —  $\Delta T_H^\circ$ ; 3 —  $\Delta T_B^\circ$ .

ванию. Находились разности в отстояниях штрихов с делениями на основной шкале 32,0 и дополнительной 91,2 от пяток реек, а затем компарировались интервалы от указанных делений до всех рабочих штрихов реек. Значения поправок вводились в каждый отсчет по рейкам. Средняя квадратическая ошибка компарирования делений реек, вычисленная по разностям двойных измерений, получилась равной  $\pm 0,018$  мм.

Измерения выполнялись по следующей программе:

1. Прием нивелирования по правой (левой) нивелировке длинным лучом состоит из двух полуприемов: первый полуприем правой нивелировки включает в себя отсчет по основной шкале задней рейки, по основной шкале передней рейки, по дополнительной шкале передней рейки и отсчет по дополнительной шкале задней рейки. Второй полуприем включает те же отсчеты, но в обратной последовательности. Первый полуприем левой нивелировки начинается отсчетами по передней рейке, а второй — отсчетами по задней рейке.

2. Отдельный прием нивелирования коротким лучом соответствует программе работы на станции при нивелировании I класса, исключая отсчеты по трем нитям, так как равенство плеч выдержано с ошибкой  $\pm 1 \text{ см}$ .

3. Если нивелирование один день производилось длинным лучом, то во второй — коротким с таким расчетом, чтобы по возможности исключить оседание реперов между нивелированиями длинными и короткими лучами.

4. Программа всегда начиналась и заканчивалась выполнением метеорологических измерений с тем, чтобы средние моменты времени из двух приемов нивелирования (одного правой нивелировки, одного левой) и средние моменты предыдущего и последующего приемов метеонаблюдений примерно совпадали. Отдельный прием метеорологических измерений включает в себя измерения температуры и влажности на трех метеостанциях на указанных выше высотах, измерение силы ветра, давления и регистрацию облачности по пятибалльной системе (0, 1/4, 1/2, 3/4, 1).

Наблюдения выполнялись в течение 22 дней (с 22/VI по 16/VII 1964 г.), утром от восхода солнца и до момента сильных колебаний изображений, примерно 9<sup>h</sup>—9<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, и вечером с момента затухания колебаний до заката солнца. Нивелирование длинными лучами производилось на протяжении 14 дней и короткими — 8 дней. Всего выполнено 2128 определений  $h$  длинными лучами (по левой и правой нивелировкам) на наклонном и горизонтальном участках, 248 прямых и обратных ходов нивелирования короткими лучами по двум нивелировкам на двух участках и 969 метеоприемов.

Условия погоды в период исследований характеризуются следующими данными: ясных дней — 10, пасмурных — 3, с переменной облачностью — 9. Температура воздуха в утренние часы наблюдений изменилась примерно в пределах от 12° до 24°, в вечерние часы — от 28° до 23°. Ветры большей частью имели скорость в пределах от 0 до 3 м/сек, весьма редко 4 и 5 м/сек.

## Обработка и анализ результатов исследований

В дальнейшем будем пользоваться следующими обозначениями:

$\Delta T^\circ$  — средняя разность температур между высотами 0,5—2,5 м по измерениям на трех станциях;

$\Delta T_H^\circ$  — разность температур между высотами 0,5—1,6 м;

$\Delta T_B^\circ$  — разность температур между высотами 1,6—2,5 м;

$h$  — превышение (измеренное);

$h_{\text{испр}}$  — превышение, исправленное за ошибку рефракционного характера;

$h_{\text{ист}}$  — истинное превышение;

$\Delta H$  — нивелирование наклонного участка длинными лучами;

$\Delta G$  — нивелирование горизонтального участка длинными лучами;

$KH$  — нивелирование наклонного участка короткими лучами;

$KG$  — нивелирование горизонтального участка короткими лучами.

Полевой материал обрабатывался в следующей последовательности:

1) вычислены для каждого метеорологического приема средние моменты наблюдений и  $\Delta T^\circ$ . Кроме того, на центральной станции вычислены  $\Delta T_H^\circ$  и  $\Delta T_B^\circ$ ;

2) построено 60 графиков зависимости вертикальных градиентов температуры ( $\Delta T^\circ$ ,  $\Delta T_H^\circ$ ,  $\Delta T_B^\circ$ ) и моментов времени ( $t^h$ ) в периоды утренней и вечерней видимостей. На рис. 3 приведены указанные графики за четыре отдельные даты. Как на приведенных, так и на всех остальных графиках наблюдается вполне закономерный ход  $\Delta T^\circ$  от положительных значений (инверсия) в среднем  $+0^\circ.50$  после восхода солнца к отрицательным (нормальное распределение воздуха) в сред-

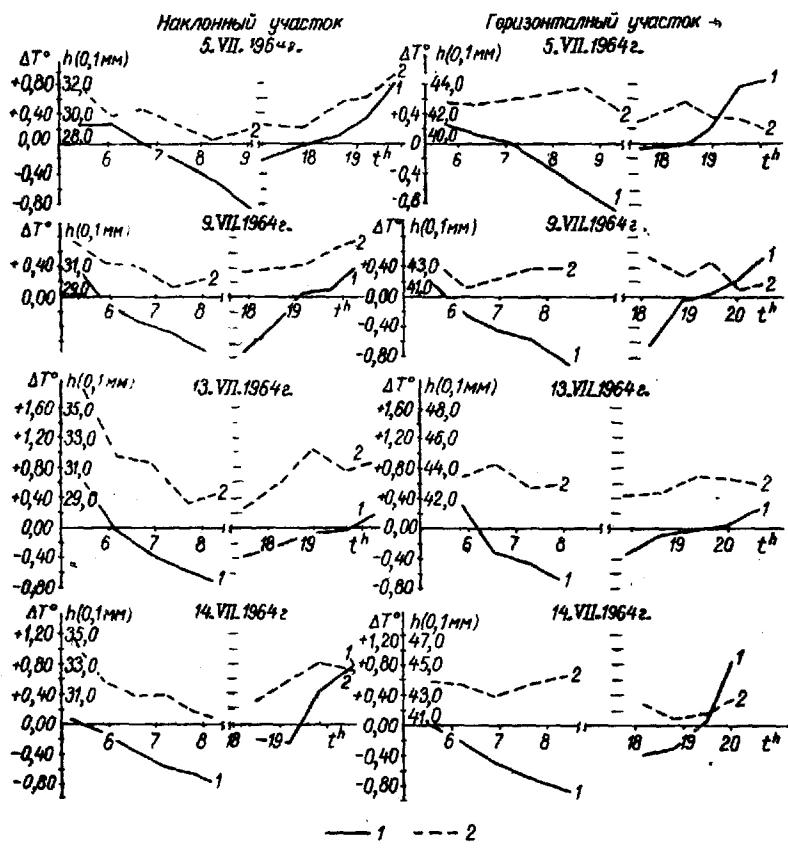


Рис. 4. Зависимости между  $\Delta T^\circ$  и  $h$  для наклонного и горизонтального участков в периоды утренней и вечерней видимости за четыре отдельные даты.

1 —  $T^\circ$ ; 2 —  $h$

нем  $-0^\circ.80$ . В вечернюю видимость  $\Delta T^\circ$  имеет обратный ход — в среднем от  $-0^\circ.42$  до  $+0^\circ.40$ . Время изотермии примерно в 6<sup>h</sup> 10<sup>m</sup> и 18<sup>h</sup> 40<sup>m</sup>. На графиках, отображающих ход  $\Delta T_H^\circ$  и  $\Delta T_B^\circ$ , средняя абсолютная величина  $\Delta T_H^\circ$  в 3—4 раза больше средней абсолютной величины  $\Delta T_B^\circ$ ;

3) вычислены средние значения измеренных превышений  $h$  из правой и левой нивелировок за каждую дату в некоторые моменты времени для всех нивелировок  $ДH$ ,  $ДГ$ ,  $КH$  и  $КГ$  и получены, таким образом, некоторые эквивалентные превышения между реперами. Составлены ведомости за каждую дату, в которых, кроме указанных превышений, записаны средние значения градиентов температуры, скорость ветра, давление, температура воздуха на высоте визирного луча, нижние и верхние градиенты ( $\Delta T_H^\circ$  и  $\Delta T_B^\circ$ ) и соответствующие этим величинам средние моменты времени. Далее составлена сводка средних

значений этих величин за 14 дней для  $\Delta H$  и  $\Delta G$  по сериям — шесть утренних и шесть вечерних. Серии образованы из данных за каждый день по соответствующим моментам времени. Средние значения  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  и  $h_{\text{ср}}$  за 14 дней для наклонного и горизонтального участков даны в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  и  $h_{\text{ср}}$  за 14 дней для наклонного и горизонтального участков

№ серий	Время	$\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$	$h_{\text{ср}} (\text{мм})$	$n$	$M$
Наклонный участок					
Ут р о					
1	5 22 <sup>м</sup>	+0,46	+1753,35	14	$\pm 0,04$
2	6 04	+0,04	+1753,14	14	$\pm 0,03$
3	6 46	-0,30	+1753,01	14	$\pm 0,02$
4	7 33	-0,44	+1752,98	14	$\pm 0,04$
5	8 14	-0,63	+1752,89	14	$\pm 0,02$
6	8 28	-0,83	+1752,82	5	$\pm 0,05$
Веч ер					
1	17h 14 <sup>м</sup>	-0,41	+1752,98	9	$\pm 0,03$
2	17 53	-0,24	+1753,01	11	$\pm 0,03$
3	18 30	-0,10	+1753,05	10	$\pm 0,01$
4	19 06	+0,06	+1753,13	13	$\pm 0,02$
5	19 46	+0,36	+1753,17	13	$\pm 0,02$
6	20 24	+0,42	+1753,18	7	$\pm 0,03$
Горизонтальный участок					
Ут р о					
1	5h 46 <sup>м</sup>	+0,22	+4,30	14	$\pm 0,03$
2	6 27	-0,20	+4,35	14	$\pm 0,03$
3	7 11	-0,36	+4,33	14	$\pm 0,03$
4	7 56	-0,56	+4,37	14	$\pm 0,04$
5	8 40	-0,72	+4,31	11	$\pm 0,04$
Веч ер					
1	17h 41 <sup>м</sup>	-0,33	+4,25	12	$\pm 0,02$
2	18 24	-0,14	+4,21	12	$\pm 0,02$
3	18 58	+0,04	+4,23	12	$\pm 0,03$
4	19 40	+0,29	+4,23	13	$\pm 0,02$
5	20 14	+0,61	+4,23	10	$\pm 0,03$

В таблице  $n$  — число дат;  $M$  — средняя квадратическая ошибка  $h_{\text{ср}}$ .

4) построены графики зависимости  $\Delta T^{\circ}$  и  $h$  для  $\Delta H$  и  $\Delta G$  в некоторые моменты времени за утреннюю и вечернюю видимости по каждой дате в отдельности и по средним значениям этих элементов за 14 дней. На рис. 4 приведены указанные графики за 4 отдельные даты, а на рис. 5 по средним значениям за 14 дней. На этих графиках для наклонного участка наблюдается весьма хорошая зависимость между  $\Delta T^{\circ}$  и  $h$  как по отдельным дням, так и на сводном графике. На рис. 5 при изменении  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  в утреннюю видимость на  $1^{\circ},30$  и вечернюю на  $0^{\circ},84$  на наклонном участке наблюдается соответственно изменение  $h_{\text{ср}}$  на  $0,6 \text{ мм}$  и  $0,2 \text{ мм}$ . На горизонтальном участке этой зависимости нет, т. е.  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  изменяется как обычно, а  $h_{\text{ср}}$  не изменяется ( $h_{\text{ср}}$  дает на графике примерно прямую линию);

5) выполнены вычисления, аналогичные предыдущим, для наклонного участка за шесть дней. Средние значения  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  и  $h_{\text{ср}}$  в средние моменты времени за шесть дней даны в табл. 2.

Таблица 2

Значения  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  и  $h_{\text{ср}}$  за шесть дней для наклонного участка

№ серий	Время	$\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$	$h_{\text{ср}} (\text{мм})$	$n$	$\varepsilon$	$M$
Наклонный участок						
Утром						
1	5h 18m	+0,48	+1753,43	6	-0,24	+0,05
2	5 54	+0,08	+1753,15	6	-0,07	+0,02
3	6 37	-0,34	+1753,04	6	+0,08	+0,04
4	7 18	-0,53	+1753,07	5	+0,09	+0,07
5	7 57	-0,69	+1752,89	6	+0,17	+0,04
6	8 24	-0,78	+1752,85	5	+0,20	+0,05
Вечер						
1	17h 21m	-0,44	+1752,94	3	+0,19	+0,06
2	18 00	-0,34	+1752,98	4	+0,10	+0,03
3	18 31	-0,27	+1753,05	3	0,00	+0,02
4	19 05	-0,05	+1753,15	5	0,00	+0,02
5	19 43	+0,16	+1753,15	5	-0,08	+0,04
6	20 21	+0,39	+1753,21	4	-0,08	+0,03

В табл. 2, кроме известных уже величин, приведены поправки за рефракцию  $\varepsilon$  в измеренные превышения, вычисленные на основании средних значений метеорологических элементов в соответствующие моменты времени по формуле Ф. Н. Красовского:

$$\varepsilon_{\text{мм}} = -0,00108 \frac{B}{760} \frac{t_1 - t_3}{(1 + \alpha t)^2} \frac{L^2}{h} \left[ \frac{1 - \tau}{12} + \frac{(1 - \tau)^2}{24} + \dots \right]. \quad (1)$$

В формуле (1):

$B$  — атмосферное давление;

$h$  — превышение между реперами в  $m$ ;

$L$  — расстояние между рейками в  $m$ ;

$\alpha = 0,00366$  — коэффициент расширения воздуха;

$t_3$ ,  $t_2$  и  $t_1$  — температуры воздуха на высоте луча соответственно при передней рейке, при нивелире и при задней рейке.

Величина  $\tau$  определяется из выражения

$$\tau = \frac{t_3 - t_4}{t_2 - t_1}$$

или

$$\tau = \frac{t_1 - t_2}{t_2 - t_3}.$$

На основании табл. 2 построен график (рис. 6), аналогичный предыдущим, на котором при изменении  $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ}$  на  $1^{\circ},26$  в утреннюю видимость и на  $0^{\circ},82$  в вечернюю,  $h_{\text{ср}}$  изменяется соответственно на  $0,6$  и  $0,2 \text{ мм}$ .

На графиках (рис. 5 и рис. 6) нанесено в виде прямой линии среднее за все даты по всем ходам значение превышения, полученное из нивелирования наклонного участка короткими лучами. Это превышение можно считать близким к истинному.

На рис. 6 нанесены также превышения, исправленные поправками за рефракцию, которые на графиках ложатся вблизи линий истинных превышений, т. е. поправки значительно исправляют измеренные превышения и приближают их к истинным значениям.

Важно отметить, что на графиках (рис. 5 и рис. 6) значения превышений, измеренных в момент изотермии ( $\Delta T_{\text{ср}}^{\circ} = 0$ ) на наклонном участке, весьма близки к истинному значению.

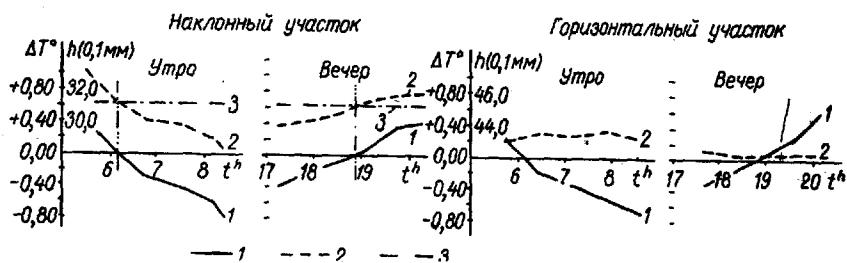


Рис. 5. Зависимости между  $\Delta T^{\circ}_{\text{ср}}$  и  $h_{\text{ср}}$  для наклонного и горизонтального участков по средним данным за 14 дней.

1 —  $\Delta T^{\circ}_{\text{ср}}$ ; 2 —  $h_{\text{ср}}$ ; 3 —  $h_{\text{ист}}$  (полученное из нивелирования КН).

В табл. 3 приведены средние за восемь дней значения превышений, полученные нивелированием наклонного участка короткими лу-чами, и средние моменты проложения ходов.

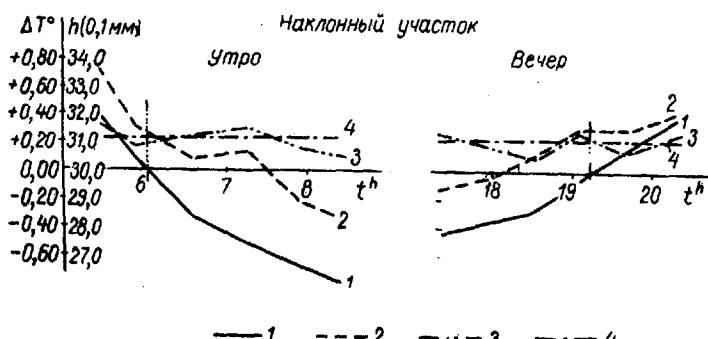


Рис. 6. Величины  $\Delta T^{\circ}_{\text{ср}}$ ,  $h_{\text{ср}}$ ,  $h_{\text{истр}}$  (средние за шесть дней) и  $h_{\text{ист}}$  в периоды утренней и вечерней видимостей для наклонного участка.

1 —  $\Delta T^{\circ}_{\text{ср}}$ ; 2 —  $h_{\text{ср}}$ ; 3 —  $h_{\text{истр}}$  (исправленное поправкой за рефракцию);  
4 —  $h_{\text{ист}}$  (полученное из нивелирования КН).

Из анализа превышений, полученных по КН, видно, что они не следуют изменению  $\Delta T^{\circ}_{\text{ср}}$ , как превышение  $ДH$ , однако незначительный ход отмечается, что объясняется, вероятно, остаточным влиянием рефракции.

Приведенные результаты исследований говорят о явном искажении превышений на наклонном участке ошибкой за рефракцию. Вывод о том, что изменение значения превышения на наклонном участке вызвано главным образом именно ошибкой рефракционного характера подтверждается следующими обстоятельствами: а) хорошая зависимость  $\Delta T^{\circ}$  и  $h$  на наклонном участке; б) отсутствие связи между  $\Delta T^{\circ}$  и  $h$  на горизонтальном участке; в) поправки за рефракцию, вычисленные по формуле Ф. Н. Красовского, выравнивают измеренные превышения и

приводят их к значениям, близким к истинному; г) значения  $h$ , измеренные в момент изотермии, весьма близкие к  $h_{\text{ист}}$ .

Установлено, что превышения, полученные из нивелирования ДГ за утреннюю видимость на 0,1 мм больше по абсолютной величине превышений, полученных в вечернюю видимость (см. табл. 1). Это, оче-

Таблица 3

Средние за 8 дней значения превышений,  
полученные нивелированием наклонного участка  
короткими лучами

№ серий	$n'$	Время	$h_{\text{ср}} \text{ (мм)}$	$\Delta h$
Утром				
1	16	5 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	+1753,18	-0,10
2	16	7 46	+1753,08	
Вечер				
1	16	17 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup>	+1753,08	+0,05
2	14	18 53	+1753,13	

В таблице  $n'$  — количество ходов (прямых и обратных);  $\Delta h$  — изменение превышения в течение видимости.

видно, объясняется односторонним температурным влиянием (расположение Солнца по отношению направления хода) на процесс нивелирования и неодинаковой освещенностью передней и задней реек при направленности трассы запад—восток.

### Выводы

1. В случае наклонного участка ошибки за рефракцию в превышениях, полученных геометрическим нивелированием, носят систематический характер и зависят в основном от вертикального градиента температуры. Практически свободными от ошибки за рефракцию будут превышения, выполненные в моменты изотермии и в моменты, близкие к ним.

Указанной ошибкой искажается в основном то направление от нивелира к рейке, которое проходит в нижнем слое воздуха.

2. Ход превышений в пределах утренней видимости равен 0,6 мм, а в вечернюю 0,3 мм, а уклонения превышений от истинных значений при этом могут достигать 0,3 мм и 0,15 мм.

3. Вряд ли имеется необходимость вычислять поправки за рефракцию в процессе производства нивелирования. Следует освобождать результаты нивелирования от ошибки за рефракцию, применяя соответствующую методику нивелирования, а именно:

а) в случае пересеченной местности часть прямого хода секции, выполненная при нормальном распределении температуры воздуха, в обратном ходе должна быть выполнена при инверсии, или наоборот;

б) при затяжном спуске или подъеме достаточно выполнять нивелирование примерно равным числом приемов при нормальном и инверсионном распределении температуры воздуха как в прямом, так и в обратном ходе на данной секции.

Следует исключать время со значительными температурными градиентами в начале и в конце утренней и вечерней видимостей.

Чем больше уклоны хода, тем строже необходимо придерживаться указанных рекомендаций.

4. Вертикальные градиенты температуры и моменты изотермии могут быть получены по измерениям температуры на двух высотах ( $0,5$  м и  $2,0$ — $2,5$  м). Для регистрации на каждой станции вертикальных температурных градиентов может быть применен несложный прибор «Термоэлектрографиентомер» [2]. Моменты изотермии в условиях степных районов УССР при устойчивой погоде наступают утром в  $1^{\text{h}}\ 00^{\text{m}}$  после восхода солнца и вечером в  $1^{\text{h}}\ 40^{\text{m}}$  до заката. При неустойчивой погоде эти моменты могут значительно сдвигаться, а сами градиенты температуры существенно уменьшаются.

Выполнение указанных выше рекомендаций в отношении методики нивелирования особенно целесообразно при специальных высокоточных нивелировках, например: при изучении вертикальных движений земной коры на стационарных полигонах, т. е. в случаях, где требуется достичь наиболее высокой точности в нивелировании.

5. Обнаруженная в результате исследований систематическая разность в превышениях на горизонтальном участке между утренними и вечерними наблюдениями величиной  $0,1$  мм при направленности хода запад—восток, видимо, вызвана влиянием односторонних температурных воздействий на процесс нивелирования и неодинаковой освещенностью задней и передней реек утром и вечером. Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Островский, Л. С. Хижак, И. Н. Кметко. Влияние рефракции в высокоточном нивелировании. Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», вып. 2, Львов, 1965.

2. Л. Р. Струвер и А. П. Истомин. Термоэлектрический метод измерения градиента температуры воздуха в приземном слое атмосферы. Труды ГГО, вып. 129, Л., 1962.

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

Работа поступила  
20 марта 1965 г.