

ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНОГО ХОДА НЕВЯЗОК ПРЕВЫШЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В ТРЕУГОЛЬНИКЕ

Известно, что основным источником ошибок геодезического нивелирования является влияние вертикальной рефракции. Для выявления суточного хода невязок превышений геодезического нивелирования в треугольнике в пересеченной местности на склонах долины были выбраны три пункта, составившие вершины треугольника. Долина имела корытообразную асимметричную форму с плоским дном шириной около 600 м, занятым под луг и огороды. По дну долины протекала маленькая речка. Восточный склон долины крутой ($25-30^\circ$), покрытый кустарником и частично лесом. Западный склон более пологий, по его основанию проходят шоссейная и железная дороги, вдоль которых по одной стороне расположен населенный пункт. Склон занят садами, огородами и смешанным лесом.

Превышение между дном долины и наиболее высоко расположенным пунктом составляет 75 м.

На всех трех пунктах треугольника производились одновременные круглосуточные измерения вертикальных углов и велись наблюдения за основными метеорологическими элементами: температурой, давлением, влажностью, силой и направлением ветра. Кроме того, регистрировалась облачность в процентах покрытия облаками небосвода.

Условия прохождения визирных лучей по направлениям 1—2, 1—3 и 3—2 показаны на профилях (рис. 1). Лучи большей частью проходили над подстилающей поверхностью на высоте около 50 м и, следовательно, находились в сфере действия рефракционного поля, создаваемого преимущественно не разнородными подстилающими поверхностями, а рельефом местности.

Полевые наблюдения производились в течение 12 суток: 3 суток в июле (с 15 по 18 июля) и 9 суток в сентябре (с 16 по 26 сентября) 1959 года. В дальнейшем эти наблюдения будем называть соответственно июльским и сентябрьским периодами.

Измерения вертикальных углов на каждом пункте велись двумя приемами по двум направлениям в июле через каждый час, а в сентябре — в каждый четный час. Всего было выполнено 415 серий одновременных двухсторонних измерений вертикальных углов по каждой стороне треугольника.

Теодолиты и визирные цели (марки полигонометрического комплекта ПК-4) устанавливались на штативах и защищались от непосредственного воздействия солнечных лучей то-

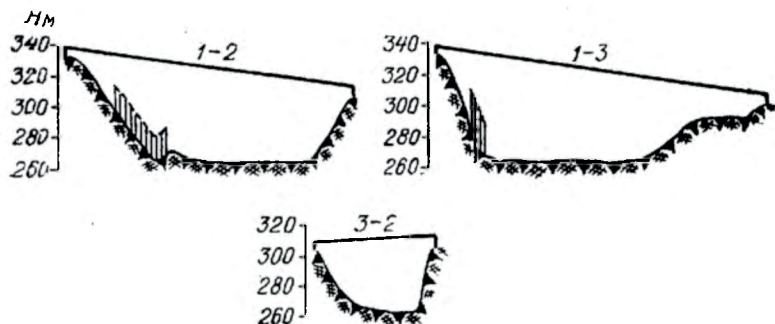


Рис. 1. Профили нивелируемых направлений.

пографическими зонтами. Визирные марки с помощью оптического отвеса устанавливались над центром знаков, а теодолиты — внецентренно. Элементы приведений (центрировки, высоты визирной марки и высоты теодолитов) определялись три раза в сутки — утром, вечером и в середине дня. По их осредненным значениям для каждого периода (июльского и сентябрьского) наблюдений измеренные вертикальные углы были приведены к центрам вершин треугольника.

Расстояния между вершинами треугольника были вычислены с ошибкой, не превышающей 1 : 10 000. Для сравнения определенных превышений геодезическим нивелированием по каждой стороне было проведено геометрическое нивелирование II класса со средней квадратической ошибкой на один километр хода $\pm 1,6$ мм. В таблице 1 приведена сводка расстояний и превышений между пунктами.

Таблица 1

Расстояния и превышения между нивелируемыми пунктами

Сторона треугольника	Расстояния, м	Превышения, м	m_n , мм
1—2	2383,08	-18,870	$\pm 2,4$
2—3	1039,93	- 1,557	1,6
3—1	2835,84	+20,427	2,7

Метеорологические элементы измерялись на высоте 1,5 м. Измерения температуры на всех трех вершинах треугольника в июльский период производились психрометрами Асмана на высотах 1,5, 2,5 и 4,5 м. В сентябрьский период измерение температуры велось как психрометрами Асмана, так и дистанционными термометрами сопротивления.

Давление на пунктах измерялось анероидами, скорость ветра — ручными анемометрами.

Метеорологические наблюдения производились параллельно с угловыми измерениями. До начала и после окончания каждой серии угловых измерений брались отсчеты по метеорологическим приборам. За окончательные значения бралось среднее арифметическое из этих измерений.

В июльский период наблюдений стояла преимущественно ясная погода, маловетренная ночью и с усилением скорости ветра до 3—4 м/сек днем. В самый жаркий, день 16 июля, суточный ход температуры достигал 15°C (30° днем и 15°C ночью). Сентябрьский период характеризуется переменной облачностью и в дневное время несколько большей силой ветра, чем в июльский период. Температура днем достигала 15—17°C, но утром понижалась до 3—4°C, а в конце периода понижалась до 0°C. Господствующее направление ветра в оба периода наблюдений было северное, т. е. вдоль долины.

Из обработки результатов метеорологических наблюдений на вершинах треугольника приведем только средние разности температур, измеренных на высотах 1,5 и 4,5 м (табл. 2).

Таблица 2

Средние разности температуры воздуха на высотах 1,5 и 4,5 м

а) Июльский период наблюдений

Время суток	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
°C	+0,2	+0,1	+0,2	+0,4	+0,3	+0,2	+0,2	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
-0,4	-0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,4	-0,1	-0,2	-0,3	+0,1	+0,1	+0,4	+0,1

б) Сентябрьский период наблюдений

Время суток	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
°C	+0,2	+0,1	+0,3	+0,2	+0,1	-0,05	-0,1	-0,3	-0,2	+0,05	+0,2	+0,2

Вычисленные превышения между вершинами треугольника

Время суток, час	Превышения по направлениям, м					
	1—2	2—1	2—3	3—2	3—1	1—3
1	2	3	4	5	6	7

Июльский период наблюдений

0	—18,725	+18,968	—1,549	+1,578	+20,570	—20,247
1	59	40	40	82	61	86
2	38	91	23	94	22	308
3	51	91	42	87	45	38
4	79	40	57	87	40	291
5	64	—	—	70	50	86
6	72	60	47	65	40	310
7	96	61	49	72	21	24
8	801	30	45	76	18	23
9	02	34	49	77	455	52
10	23	28	55	74	57	20
11	09	06	61	73	53	54
12	82	19	55	68	53	39
13	44	13	59	61	42	42
14	55	895	58	71	55	65
15	96	98	58	57	89	38
16	55	91	67	92	68	39
17	37	916	54	92	82	43
18	25	06	55	87	94	52
19	32	13	56	92	555	72
20	765	53	48	87	04	06
21	—	05	40	86	27	—
22	688	—	39	97	85	183
23	713	56	43	88	43	241

Сентябрьский период наблюдений

0	—18,743	+18,969	—1,531	+1,585	+20,635	—20,211
2	83	72	40	79	09	321
4	76	75	25	82	28	277
6	47	69	26	85	09	247
8	82	40	37	60	508	308
10	60	10	53	64	492	31
12	85	11	52	61	61	46
14	91	08	54	62	55	71
16	73	19	39	67	94	23
18	80	25	42	72	540	05
20	67	53	36	85	98	254
22	65	95	29	88	618	37

Данные таблицы 2 характеризуют дневной ход градиентов температуры, причем величины градиентов значительно превосходят нормальный градиент.

Обработывая результаты измерений вертикальных углов, мы вычислили средние почасовые значения углов для июльского и сентябрьского периодов наблюдений. По осредненным углам, расстояниям, высотам инструментов и высотам

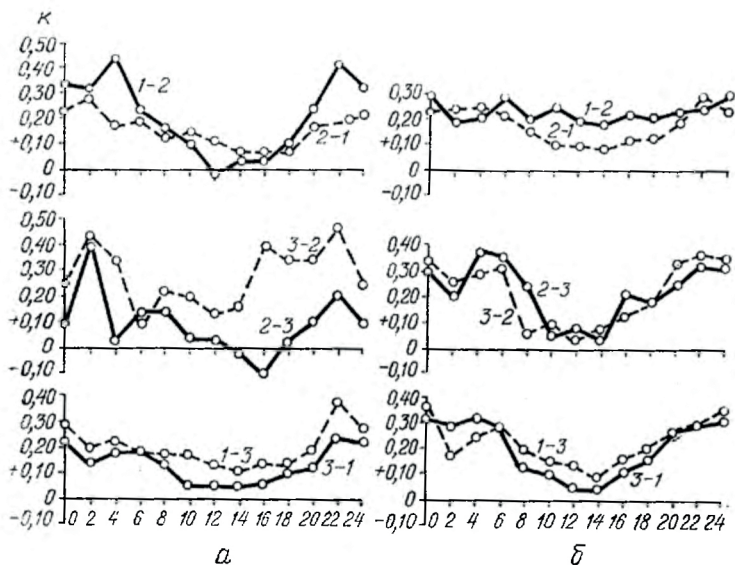


Рис. 2. Суточный ход коэффициента рефракции для нивелируемых направлений

а — июльский период; б — сентябрьский период.

визирных марок были вычислены превышения между пунктами (табл. 3). При этом в вычисленные превышения вводилась поправка только за кривизну Земли, поправка за рефракцию не вводилась.

Рассмотрим вначале суточное изменение рефракции по каждому направлению. Для анализа вычисленных превышений из одностороннего геодезического нивелирования и определения степени влияния вертикальной рефракции были вычислены разности превышений δh геодезического и геометрического нивелирования, по которым вычислялись коэффициенты рефракции, пользуясь формулой

$$K = \frac{\delta h}{p}, \quad (1)$$

где p — поправка за кривизну Земли.

По результатам вычислений построены графики суточного хода коэффициента рефракции (рис. 2). Из графиков видно, что на всем протяжении суток как в июльский, так и в сентябрьский периоды наблюдений вычисленные превышения искажены рефракцией и что влияние рефракции имеет суточный ход. В течение суток вычисленные превышения бывают больше истинных, при этом ночью, утром и вечером ошибки рефракционного происхождения преимущественно больше в 2—3 раза, чем в дневные часы. Кроме того, из графиков видно, что влияние рефракции при переходе от прямых к обратным превышениям разное по величине, а также разное при переходе от одного направления к другому. Сопоставляя суточный ход коэффициента рефракции с суточным ходом разностей температуры (табл. 2), легко заметить подобие их хода. Однако вычисленные коэффициенты по метеорологическим элементам, измеренным на пунктах наблюдения, не отражают действительного положения для данных условий прохождения визирного луча.

При дальнейшем анализе суточного изменения влияния рефракции нами были вычислены средние коэффициенты для каждого направления: за сутки, дневное время (с 8 до 19 час.) и ночное, утреннее и вечернее (с 20 до 7 час.), которые приведены в таблице 4.

Таблица 4

Промежутки времени	Средние коэффициенты рефракции					
	Нивелируемые направления					
	1—2	2—1	2—3	3—2	3—1	1—3
Июльский период наблюдений						
Сутки	+0,180	+0,140	+0,083	+0,267	+0,131	+0,176
	+0,160		+0,175		+0,154	
			+0,163			
Дневное время (с 8 до 19 час.)	+0,070	+0,095	+0,012	+0,231	+0,078	+0,130
	+0,082		+0,122		+0,104	
			+0,105			
Ночное, утрен- нее и вечернее время (с 20 до 7 час.)	+0,289	+0,194	+0,160	+0,303	+0,182	+0,227
	+0,242		+0,232		+0,204	
			+0,226			

Промежутки времени	Нивелируемые направления					
	1—2	2—1	2—3	3—2	3—1	1—3
Сентябрьский период наблюдений						
Сутки	+0,222	+0,170	+0,212	+0,200	+0,201	+0,211
	+0,196		+0,206		+0,206	
			+0,201			
Дневное время (с 8 до 19 час.)	+0,205	+0,110	+0,127	+0,086	+0,102	+0,153
	+0,158		+0,106		+0,128	
			+0,131			
Ночное, утрен- нее и вечернее время (с 20 до 7 час.)	+0,239	+0,229	+0,304	+0,307	+0,300	+0,268
	+0,233		+0,306		+0,286	
			+0,274			

Данные таблицы 4 подтверждают сделанные ранее выводы об изменении коэффициента рефракции в течение суток, об изменении коэффициента рефракции при переходе от прямого к обратному направлению и при переходе от одного направления к другому.

Кроме того, отметим, что коэффициент рефракции при большой высоте визирного луча над подстилающей поверхностью, как это имело место при данных исследованиях (около 50 м), в дневное время в среднем близкий к принятому 0,14.

Для более полного изучения влияния рефракции на точность геодезического нивелирования нами были вычислены почасовые невязки превышений в треугольнике f_h по односторонним (прямым и обратным) и одновременным двухсторонним измерениям вертикальных углов. Результаты этих вычислений показаны на рис. 3.

На основании приведенных графиков (рис. 3) можно заключить, что ночные, утренние и вечерние наблюдения при одностороннем геодезическом нивелировании содержат приблизительно в два раза большие рефракционные ошибки, чем в дневные часы. Суточный ход невязок превышений в треугольнике аналогичен суточному ходу коэффициента рефракции и более ярко выражен. В июльский период наблюдений невязки превышений в треугольнике в дневное время для

прямых (1—2—3—1) и обратных (1—3—2—1) превышений отличаются на большую величину (до 150 мм), тогда как для сентябрьского периода это отличие незначительно. Результаты одновременного двухстороннего геодезического нивелирования содержат незначительные по величине ошибки, которые не превосходят ошибок измерений.

Таким образом, одновременное двухстороннее геодезическое нивелирование дает гораздо большую точность, чем

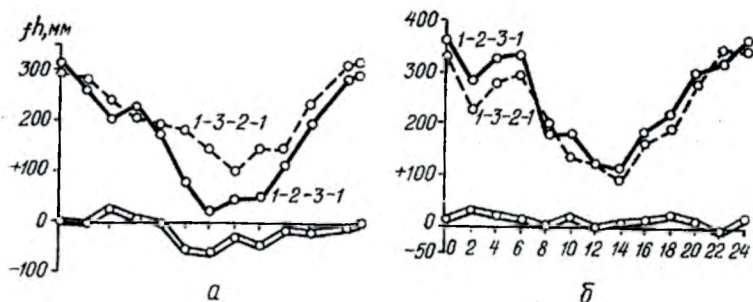


Рис. 3. Суточный ход невязок превышений геодезического нивелирования в треугольнике
а — июльский период; б — сентябрьский период.

одностороннее, и практически во все время суток одинаковую точность определения превышений.

Учитывая то, что одновременное двухстороннее геодезическое нивелирование в практике геодезического производства по ряду причин не может найти широкого применения, при дальнейшем анализе результатов наблюдений мы исследовали точность неодновременного двухстороннего геодезического нивелирования для дневного времени суток (с 8 до 18 час.).

При обработке результатов полевых исследований мы брали разные промежутки времени между измерениями прямых и обратных вертикальных углов. Так, например, измерения вертикальных углов в 8 часов принимались за прямые, а измерения вертикальных углов в обратном направлении брались в 10, 12, 14, 16 и 18 часов, т. е. измерения вертикальных углов в обратном направлении выполнялись через 2, 4, 6, 8 и 10 часов. Затем за прямые брались измерения, выполненные в 10 часов, а в обратном направлении — измерения, выполненные в 12, 14, 16 и 18 часов, т. е. с промежутком времени в 2, 4, 6 и 8 часов и т. д. Такая комбинация делалась как внутри каждого периода наблюдений, так и между периодами. По вычисленным таким образом невязкам в треугольнике представляется возможным судить о точ-

ности неодновременного геодезического нивелирования. Осреднив абсолютные невязки в треугольнике, мы составили таблицу 5.

Таблица 5

Средние невязки превышений неодновременного геодезического двухстороннего нивелирования в треугольнике для дневного времени суток с 8 до 18 час., мм

Одно- стороннее нивели- рование	Одновре- менное двухсторон- нее нивели- рование	Неодновременное двухстороннее нивелирование с промежутком времени между измерениями вертикальных углов в прямом и обратном направлениях				
		2 час.	4 час.	6 час.	8 час.	10 час.
Июльский период наблюдений						
115	38	36	34	44	22	15
Сентябрьский период наблюдений						
150	8	23	33	29	10	2
Прямые июльского обратные сентябрьского периода						
—	—	40	46	50	38	24
Прямые сентябрьского обратные июльского периода						
—	—	19	28	26	16	22

Для сравнения в этой же таблице приведены невязки для того же времени суток при одностороннем и одновременном двухстороннем геодезическом нивелировании.

В результате проведенного анализа полученных полевых исследований мы приходим к выводу, что наиболее точные результаты геодезического нивелирования могут быть получены только в случае двухсторонних наблюдений, но не обязательно одновременных.

Лучшие результаты неодновременного геодезического нивелирования при прохождении визирного луча на значитель-

ной высоте могут быть получены при симметричном измерении прямых и обратных вертикальных углов по отношению к полуденному времени. Невязки в треугольнике при несовременном геодезическом нивелировании не превышают допусков для геометрического нивелирования IV класса.

Львовский политехнический
институт

Работа поступила
23 мая 1964 г.