

А. Л. ОСТРОВСКИЙ, Р. М. ТАРТАЧИНСКИЙ

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, СИММЕТРИЧНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО МОМЕНТОВ ИЗОТЕРМИИ ВОЗДУШНЫХ МАСС, В ЮЖНОМ СТЕПНОМ РАЙОНЕ

В инструкции по построению опорных геодезических сетей [1] указывается, что наблюдения углов на пунктах I класса «должны продолжаться не менее двух суток в зависимости от районов работ и условий наблюдений. В течение указанного срока программа должна отрабатываться примерно равными частями в каждый период наблюдений». С точки зрения действия боковой рефракции на результаты измерений такое требование более правильно, чем содержащееся в ранее принятой, ныне отмененной, инструкции: при наблюдениях на световые сигналы делить программу измерения углов на дневные и ночные наблюдения.

В самом деле, при делении программы примерно поровну на дневные и ночные наблюдения большая часть дневных измерений будет приходиться на вечерние видимость при инверсии. Все ночные наблюдения также будут выполнены при инверсии. Следовательно, средние значения углов будут обременены ошибками рефракции. Выполняя требования новой инструкции и учитывая, что геодезическое производство в настоящее время почти не ведет угловых измерений ночью, следует ожидать, что всегда часть наблюдений будет выполнена при инверсии, а часть — при нормальном распределении температуры воздуха с высотой, и ошибки рефракционного происхождения в какой-то мере компенсируются.

Тем не менее, для полной компенсации рефракционных влияний следовало бы поставить требование выполнять программу примерно равными частями относительно моментов изотермии воздушных масс, которую условимся называть симметричной относительно моментов «нулевых» рефракций.

Такая программа впервые предложена в работе [3] и экспериментировалась [4] применительно к полигонометрии (два направления) в средней полосе СССР. Представляет интерес проверить эффективность и возможность применения этой программы в триангуляции — при большем числе направлений, когда возникает необходимость уравнивания углов на станции. В настоящей статье описывается опыт применения такой программы на геодезическом четырехугольнике в южном степном районе с особыми условиями видимости и сильно выраженными вертикальными температурными градиентами. Расположение пунктов показано на рис. 1. Высоты визирных лучей над подстилающими поверхностями колеблются в пределах 2—40 м, при средних значениях 15—25 м.

Анализируя таблицу, замечаем: а) продолжительность видимости, как и следовало ожидать, сокращается с увеличением расстояния; б) периоды видимости при инверсионном и нормальном распределении температуры соизмеримы и, следовательно, выполнение симметричной программы угловых измерений вполне реально; в) продолжительность утренних видимостей не на много короче вечерних. Это, вероятно, вообще характерно для южных районов. Так, Л. П. Пеллинен в [5] указывает, что утренний период видимости на юге равен вечернему.

Перейдем теперь к сопоставлению колебаний изображений и разности температур ΔT на высотах 2,5 и 0,5 м.

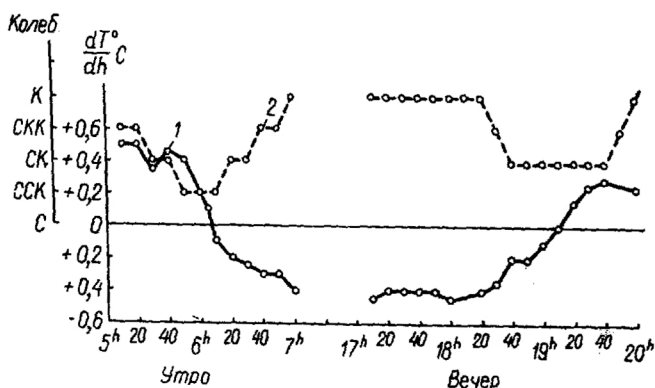


Рис. 2. Ход разности температур (1) и колебаний изображений (2).

На рис. 2 показан ход разности температур и колебаний изображений утром и вечером по осредненным данным за четыре солнечных дня. Как видно из графика, время изотермии ($\frac{dT}{dh} \approx 0$) примерно совпадает с серединой промежутка времени минимальных колебаний. Такое совпадение имеет место не только по осредненным данным. Нами было построено 24 аналогичных графика (на каждую видимость), по которым определялись сдвиги моментов изотермии относительно середины отрезков времени с минимальными колебаниями. В результате получена таблица 2.

Таблица 2

Несовпадение середины отрезков времени минимальных колебаний с «нулевыми» градиентами температуры

Дата	Утро		Вечер	
	запазд.	опереж.	запазд.	опереж.
5 июля		совпад.		совпад.
6 "	11 мин.			совпад.
7 "		совпад.		совпад.
8 "		совпад.		совпад.
9 "	3 мин.		15 мин.	
10 "		10 мин.	10 мин.	
11 "		21 мин.		20 мин.
12 "	17 мин.			18 мин.
13 "		15 мин.		15 мин.
14 "		20 мин.		совпад.
15 "		совпад.		совпад.
16 "		10 мин.	10 мин.	

Полученные сдвиги не подчиняются какой-либо закономерности, т. е. носят случайный характер и объясняются, очевидно, ошибками измерений температуры и определения на глаз бальности колебания. В среднем они почти полностью компенсируются. Колебания изображений и градиенты температуры во время наблюдений всегда находились в чрезвычайно тесной связи. Так, например, если разность температур была более $\pm 0,3^\circ\text{C}$, то наблюдатель мог, не глядя в трубу, безошибочно утверждать, что видимость отсутствует (колебания K или $СКК$). Такая закономерность может быть объяснена тем, что в степ-

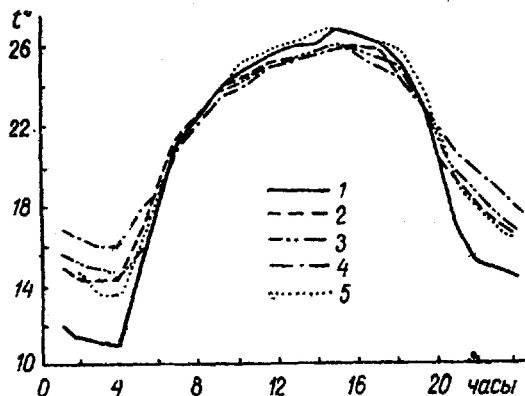


Рис. 3. Суточный ход температуры воздуха за период с малооблачной погодой (26/VI—3/VII 1956 г.) по наблюдениям в южном всхолмленном районе.

1 — подножье склона; 2 — середина юго-западного склона; 3 — верхняя треть склона; 4 — вершина; 5 — плато.

пературы воздуха из-за турбулентного перемешивания менее выражены. В ранние утренние часы после восхода солнца и вечером перед заходом термические различия сглаживаются, и температурное поле становится наиболее однородным. Типичный суточный ход температуры воздуха для южного степного района показан на рис. 3, заимствованном из работы [2].

Как видно из рисунка, изотермия воздушных масс наступает утром после 6 часов и вечером около 19 часов. Именно в это время имеет место изотермия температуры по вертикали. Таким образом, измерениями температуры воздуха на разных высотах в одной точке определяются моменты изотермии на некотором температурном поле. Поэтому и совпадают середины отрезков времени с малыми колебаниями с моментами перехода через нуль вертикальных градиентов температуры в точке А. Однако промежутки времени, в которые имели место колебания с минимальной бальностью, достаточно велики (так, на рис. 2 утром — 20 мин., вечером — 60 мин.).

По колебаниям изображений фактически определяются не моменты изотермии, а промежутки времени с малыми градиентами температуры. А так как при данных условиях наблюдений мы не имели совершенно спокойных изображений, то для более точного определения моментов перехода градиентов температуры в приземном слое воздуха через нуль использовались измерения температуры психрометрами Асмана на высотах 1, 1,5, 3,0 м.

Измерение углов на всех пунктах четырехугольника велось на визирные цилиндры теодолитом ТТ 2/6 со штатива, устанавливаемого

ном районе с примерно одинаковой подстилающей поверхностью основной причиной, вызывающей неоднородность температуры (плотности) воздушных масс, является рельеф местности. Закономерности распределения температуры воздуха в холмистом рельефе изложены в фундаментальной, обобщающей работе [2]. Различия в температуре воздуха над различными формами рельефа (долина, склон, вершина) в течение суток почти всегда, исключая погоду с холодной адвекцией, меняются по величине и знаку. Наиболее значительные различия температуры наблюдаются ночью.

Днем различия в режиме тем-

на вкопанные колья, способом во всех комбинациях в соответствии с требованиями инструкции [1] (при числе направлений $n = 3$ число приемов $m = 12$) с той, однако, разницей, что углы измерялись равным числом приемов относительно моментов изотермии воздушных масс и допускались колебания углов между приемами в группах до 3".

В первую видимость программа выполнялась как обычно. Затем на основании температурных измерений находились моменты изотермии и выполненные приемы делились на две группы. При второй и последующих видимостях число приемов измерения каждого угла как при инверсии, так и при нормальном распределении доводилось до шести. Средние не редуцированные значения углов, полученные из шести приемов при нормальном и инверсионном распределении температуры, средние значения углов из программы (12 приемов), уравненные на станции углы, средние квадратические ошибки одного приема μ и средние квадратические ошибки уравненных значений M приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения измеренных углов

Наименование	Нормальное распределение			Инверсия			Средние значения из программы		
	1—2	2—3	1—3	1—2	2—3	1—3	1—2	2—3	1—3
Средние значения углов	Пункт I								
Углы, уравненные на станции	28",56	28",48	57",58	30",13	28",57	58",62	29",34	28",52	58",10
μ	28, 74	28, 66	57, 40	30, 10	28, 54	58, 65	29, 42	28, 60	58, 02
M	$\pm 0",79$			$\pm 0",71$			$\pm 0",95$		
	$\pm 0, 26$			$\pm 0, 24$			$\pm 0, 22$		
Средние значения углов	Пункт II								
Углы, уравненные на станции	9",12	28",98	36",26	9",42	30",78	39",74	9",27	29",88	39",00
μ	9, 17	29, 03	38, 21	9, 27	30, 63	39, 87	9, 22	29, 83	39, 05
M	$\pm 1",01$			$\pm 0",95$			$\pm 1",21$		
	$\pm 0, 34$			$\pm 0, 32$			$\pm 0, 29$		
Средние значения углов	Пункт III								
Углы, уравненные на станции	55",10	1",98	57",28	52",28	2",28	54",97	53",69	2",13	56",12
μ	55, 17	2, 05	57, 21	52, 42	2, 42	54, 83	53, 79	2, 23	56, 02
M	$\pm 0",73$			$\pm 0",61$			$\pm 1",21$		
	$\pm 0, 24$			$\pm 0, 20$			$\pm 0, 29$		
Средние значения углов	Пункт IV								
Углы, уравненные на станции	21",77	9",44	31",07	23",32	8",20	31",22	22",54	8",82	31",20
μ	21, 72	9, 39	31, 12	23, 25	8, 13	31, 39	22, 49	8, 77	31, 25
M	$\pm 0",80$			$\pm 0",76$			$\pm 1",00$		
	$\pm 0, 27$			$\pm 0, 25$			$\pm 0, 24$		

Ошибки μ и M вычислены соответственно по формулам:

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{2 [\sigma\sigma]}{n(n-1)(m-1)}}; \quad (1)$$

$$M = \pm \frac{\mu}{\sqrt{\frac{m \cdot n}{z}}}, \quad (2)$$

где ν — отклонения результатов измерения углов в отдельных приемах от среднего значения.

Рассматривая таблицу, замечаем, что на всех пунктах ошибки в группах приемов μ_r меньше таких же ошибок μ_n , вычисленных из целых программ, т. е. имеет место большая согласованность приемов при одинаковой стратификации воздушных масс. Такая закономерность объясняется, по-видимому, тем, что величины μ_r в меньшей степени содержат составляющие, обусловленные действием рефракции, тогда как величины μ_n полностью содержат, кроме прочих ошибок, и погрешности рефракционного характера.

Подсчитаем по средним значениям величины $\mu_{r.c.p}$ и $\mu_{n.c.p}$ среднее квадратическое влияние рефракции — μ_r

$$\mu_r = \pm \sqrt{\mu_{n.c.p}^2 - \mu_{r.c.p}^2}; \quad (3)$$

$$\mu_r = \pm \sqrt{(1,09)^2 - (0,80)^2} = 0",74,$$

что в пределе даст около 1",5.

Средние значения углов при инверсии и нормальном распределении температуры значительно отличаются. Если эти разности Δ_{1-k} действительно обусловлены рефракцией, то на любом пункте, независимо от того, как искажаются направления, образующие углы β_i , должно выполняться условие

$$\Delta_{1-2} + \Delta_{2-3} = \Delta_{1-3}. \quad (4)$$

Принято

$$\Delta_{1-k} = \beta_{\text{норм}} - \beta_{\text{инв}} \quad (5)$$

Данные табл. 4 подтверждают это положение, причем максимальное $\delta_\Delta = \Delta_{1-3} - (\Delta_{1-2} + \Delta_{2-3})$ составляет +0",63. По совершенно понятным причинам более точного выполнения условия (4) вряд ли следовало ожидать.

Величины изменения углов

Таблица 4

№ пунктов	Δ_{1-2}	Δ_{2-3}	Δ_{1-3}	$\Delta_{1-2} + \Delta_{2-3}$	$\delta_\Delta = \Delta_{1-3} - (\Delta_{1-2} + \Delta_{2-3})$
I.	-1",57	-0",09	-1",03	-1",66	+0",63
II	-0,30	-1,80	-1,48	-2,10	+0,62
III	+2,82	-0,30	+2,31	+2,52	-0,21
IV	-1,55	+1,22	-0,25	-0,33	+0,08

Рассмотрим теперь, как распределились невязки трех независимых треугольников, полученные по приведенным значениям углов при нормальном, инверсионном распределении температуры воздуха и средним значениям из программы.

Величины невязок приведены в таблице 5. Во всех случаях знаки невязок с переходом от нормального распределения температуры к инверсионному меняются на обратные, а величины невязок по значениям углов из программы находятся в пределах одной секунды, т. е. почти в три раза меньше допустимых в триангуляции I класса.

Приведенные значения углов и невязки треугольников

Названия треуголь- ников	№ углов	Нормальное распределение температуры	Инверсия	Среднее из программы
II—III—IV	II	62° 13 47,49	47,49	47,49
	III	43 43 05,30	05,80	06,99
	IV	74 03 08,18	4,04	04,68
	Σ	180 00 00,97	57,43	59,21
IV—I—II	ε*	0,07	0,07	0,07
	ω	+0,90	—2,64	—0,86
	IV	78 08 21,24	22,77	22,01
	I	55 53 05,83	07,08	06,45
	II	45 58 31,08	32,68	31,88
	Σ	179 59 58,15	2,53	0,34
	ε	0,09	0,09	0,09
	ω	—1,94	+2,44	+0,25
III—IV—I	III	28 09 02,56	08 59,81	09 01,18
	IV	121 51 26,55	26,82	26,68
	I	29 59 33,39	33,27	33,33
	Σ	180 00 2,50	59,90	1,19
	ε	0,07	0,07	0,07
	ω	+2,43	—0,17	+1,12

ε* — сферический избыток

Теперь остается произвести оценку точности угловых измерений по формуле Ферерро

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{[\omega\omega]}{3n}}, \quad (6)$$

где ω — невязки треугольников и n — их число.

Вычисления дают: $\mu_{\text{норм}} = \pm 1,08$; $\mu_{\text{инв}} = \pm 1,20$; $\mu_n = \pm 0,48$.

Оценка по формуле Ферерро в противовес оценке по формуле (1) дает μ_n (для симметричной программы) практически без влияния внешних условий, тогда как вычисленные по формуле Ферерро величины $\mu_{\text{норм}}$ и $\mu_{\text{инв}}$ содержат ошибки рефракционного происхождения. Это позволяет еще раз определить среднее квадратическое влияние рефракции:

$$\mu_r = \pm \sqrt{\frac{\mu_{\text{норм. инв}}^2}{2} - \mu_n^2} \quad (7)$$

или $\mu_r = \pm 0,64$, а в пределе $\mu_{r, \text{пред}}$ около $1'',3$. Хотя число треугольников небольшое, средние квадратические влияния рефракции, определенные по формуле (3) и (7), находятся в достаточном согласии.

Резюмируя все сказанное, можно сделать вывод, что применение программы измерения горизонтальных углов, симметричной относительно моментов изотермии воздушных масс, приводит к значительному исключению рефракционных влияний.

Поэтому считаем, что применение такой программы следует рекомендовать в триангуляции и особенно в полигонометрии I класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция о построении государственной геодезической сети Союза ССР. Геодезиздат, 1961.
2. И. А. Гольцберг. Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры. Гидрометеиздат. Л., 1962.
3. А. Л. Островский. О суточном ходе угловых невязок треугольников, вызванном боковой рефракцией. Научные записки ЛПИ, вып. 82, серия геодезическая, № 7, Львов, 1962.
4. А. Л. Островский. К вопросу программы угловых измерений при свето- и радиодальномерной полигонометрии. Межведомственный республиканский научно-технический сборник «Инженерная геодезия», № 1, Киев, 1964.
5. Л. П. Пеллинен. Исследования по угловым измерениям в триангуляции. Труды ЦНИИГАиК, Геодезиздат, вып. 114, 1957.
6. Л. С. Хижак. Связь между колебаниями изображений и ошибками углов рефракционного происхождения. Межведомственный республиканский научно-технический сборник «Геодезия, картография, аэрофотосъемка», вып. I, изд-во Львовского ун-та, 1964.

Работа поступила
10 марта 1965 г.