Б. М. ДЖУМАН

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ В ПЕРИОДЫ СПОКОЙНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ВЕТРЕ

Рефракционные искажения измеренных зенитных расстояний вызваны неоднородностью и нестационарностью поля показателя преломления света в приземном слое воздуха.

Эти неоднородности зависят от времени, условий погоды, высоты прохождения визирного луча и характера подстилающей поверхности.

Как показано [3], в период спокойных изображений при наличии ветра неоднородности температурного поля минимальны. В эти периоды величины коэффициентов рефракции для различных линий нивелирования более стабильны, чем в другие периоды дня [1]. С целью исследования точности измерения зенитных расстояний в указанные периоды на геодезическом полигоне Львовского политехнического института с 1963—1964 гг. велись специальные наблюдения.

Измерения зенитных расстояний производились теодолитами ОТ-02 с 6/IX по 25/IX 63 г. и с 1/VIII по 2/IX 64 г. на пункте НБ и с 4/IX по 7/X 64 г. на 16 пунктах сети триангуляции 2, 3 класса. На пункте НБ проводились односторонние наблюдения по направлениям КБ, М, СВ. Длины линий нивелирования, при средних высотах визирных лучей — 4 *м*, 5 *м*, 20 *м*, соответственно равны — 3,2 *км*, 2,4 *км*, 2,9 *км*. На пунктах сети триангуляции наблюдения выполнялись двумя наблюдателями. Продолжительность наблюдений на каждом пункте составляла 2—5 дней. Средние высоты прохождения визирных лучей при длинах линий 2—20 *км* колебались в пределах от 6 до 80 *м*.

В периоды утренних и вечерних видимостей проводились сплошные наблюдения, в 12 и 14 часов измерялось по 2—3 приема.

Одновременно для каждого направления велась фиксация колебаний изображений визуально по пятибальной системе.

Кроме того, во время наблюдений производились измерения температуры на высотах 1 и 3 *м* аспирационными психрометрами, скорости ветра на высоте 1,5 *м* — ручными анемометрами и давления — барометром-анероидом.

Измерение высот визирных целей выполнялось с точностью, не превышавшей 2—3 *см*. Высоты пунктов триангуляции получены из геометрического нивелирования 2, 4 класса.

По всем линиям нивелирования были вычислены теоретические зенитные расстояния и отдельно для каждого приема коэффициенты рефракции. Поправки за непараллельность уровенных поверхностей в результаты обработки не вводились.

Для всех линий нивелирования вычислены эквивалентные высоты с использованием профилей, составленных по карте масштаба 1 : 50 000.

Рассмотрим зависимость коэффициента рефракции от скорости ветра.

Таблица 1

Зависимость коэффициента рефракции от скорости ветра

V м/сек	Периоды спокойных изображений						
	0—0,5	0,5—1	1—1,5	1,5—2	2—3	3—5	Более 5
	Линия НБ—СВ (1964 г.)						
к	+0,185	+0,149	+0,142	+0,145	+0,144	+0,147	—
n	13	20	30	32	18	6	—
M	±0,013	±0,005	±0,004	±0,005	±0,007	±0,012	—
	Линия НБ—СВ (1963 г.)						
к	+0,243	+0,188	+0,156	+0,152	+0,177	+0,152	—
n	10	9	13	4	8	5	—
M	±0,030	±0,018	±0,017	±0,014	±0,015	±0,013	—
	Линия НБ—КБ						
к	+0,469	+0,175	+0,178	+0,147	+0,163	—	—
n	8	10	16	13	13	—	—
M	±0,123	±0,019	±0,020	±0,013	±0,011	—	—
	Направления сети триангуляции						
к	+0,184	+0,159	+0,154	+0,161	+0,163	+0,160	+0,165
n	46	20	12	18	26	50	22
M	±0,005	±0,004	±0,003	±0,003	±0,003	±0,002	±0,003
	Дневные периоды 12—16 часов						
V м/сек	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	Более 6
	Направления сети триангуляции						
к	+0,143	+0,130	+0,120	+0,105	+0,101	+0,121	+0,144
n	19	12	28	36	38	34	19
M	±0,005	±0,010	±0,008	±0,006	±0,006	±0,005	±0,007

В табл. 1 даны средние коэффициенты рефракции, вычисленные из *n* определений для каждого интервала скорости ветра.

Точность полученных результатов характеризуется средней квадратической ошибкой среднего арифметического *M*.

С целью уменьшения систематических влияний, вызванных ошибками инструментального происхождения, высот пунктов и высот визирных целей, средние коэффициенты рефракции вычислены для каждой линии отдельно. Кроме того, средние коэффициенты рефракции вычислены для направлений сети триангуляции, составивших отдельную группу. Для уменьшения указанных ошибок в обработку взяты линии, длиной более 6 *км*.

Как видно из табл. 1, в период спокойных изображений величина коэффициента рефракции для каждой отдельной линии и группы линий нивелирования остается постоянной в пределах точности полученных результатов при скорости ветра более 0,5 *м/сек*.

Для интервала скорости ветра 0—0,5 *м/сек* величина коэффициента рефракции и ее средняя квадратическая ошибка значительно отличается от соответствующих величин других интервалов.

Поэтому в периоды спокойных изображений при отсутствии ветра (вернее, при его скорости меньше 0,5 *м/сек*) возможна значительная неоднородность рефракционного поля, вызванная инверсией температуры. В дневные периоды минимум коэффициента рефракции наблюдается при скорости ветра 3—5 *м/сек*, при увеличении и уменьшении скорости ветра коэффициент рефракции увеличивается.

Зависимость коэффициента рефракции от температуры показана в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость коэффициента рефракции от температуры

T°	8—12	12—16	16—20	20—24	24—28
			Линия НБ—СВ		
к	+0,142	+0,146	+0,153	+0,145	+0,152
n	21	31	33	29	12
M	±0,007	±0,004	±0,005	±0,004	±0,006

T°	8—14	14—17	17—20	20—23
		Направления сети триангуляции		
к	+0,163	+0,161	+0,162	+0,161
n	20	26	18	14
M	±0,002	±0,002	±0,002	±0,002

Здесь приводятся результаты только для периода спокойных изображений при ветре.

Для всех температурных интервалов вычислены средние коэффициенты рефракции, полученные из *n* значений и средние квадратические ошибки результатов. Для исключения ошибок, вызванных определением высот пунктов триангуляции, полученных из геометрического нивелирования, коэффициенты рефракции взяты для направлений сети из двухсторонних измерений.

Как видно из табл. 2, в диапазоне 10—26° и при данной точности полученных результатов нельзя установить зависимости коэффициента рефракции от температуры.

С целью выявления зависимости величины коэффициента рефракции от высоты прохождения визирного луча для каждого интервала эквивалентных высот вычислены средние коэффициенты рефракции и их средние квадратические ошибки *M* (см. табл. 3).

В табл. 3 приведены результаты обработки для периода спокойных изображений при ветре и (для сравнения), в дневные периоды.

Как видно, в период 12—16 часов наблюдается значительное закономерное изменение величины коэффициента рефракции в зависимости от высоты прохождения визирного луча над подстилающей поверхностью. Однако закономерность этого изменения может быть различной в зависимости от географических, метеорологических и других факторов.

В периоды спокойных изображений при ветре в диапазоне высот 3—60 *м*, не наблюдается зависимости величины коэффициента рефракции от высоты прохождения визирного луча при данной точности полученных результатов.

Остановимся на сравнительной оценке точности измерения зенитных расстояний в различные периоды суток и при различных условиях погоды.

Таблица 3

Зависимость коэффициента рефракции от эквивалентной высоты

$h_э$	3—10	10—20	20—30	30—40	40—60
Период спокойных изображений при ветре					
k	+0,166	+0,163	+0,160	+0,162	+0,160
n	45	48	76	66	50
M	±0,007	±0,004	±0,004	±0,002	±0,002
Дневные периоды 12.00—13.00					
k	—0,243	+0,024	+0,068	+0,122	+0,127
n	44	65	107	40	30
M	±0,040	±0,012	±0,006	±0,006	±0,005
14.00—16.00					
k	—0,274	+0,028	+0,089	+0,127	+0,128
n	40	61	77	46	33
M	±0,035	±0,013	±0,006	±0,005	±0,005

Результаты обработки материалов исследований сведены в таблицы 4, 5, 6.

Таблица 4

Сравнение точности измерения зенитных расстояний при $h_{эср}=4$ *м*

Период	12	14	16	18	С. И. В.	$\frac{dT}{dh}=0$
$h_{эср}$—4 *м* (3,1—4,5) $S_{ср}$=2,8 *км* (2,4—3,2)						
Ясно						
k	—0,408	—0,396	—0,286	+0,039	+0,169	+0,245
n	22	11	17	21	45	27
m_k	±0,223	±0,196	±0,130	±0,177	±0,063	±0,239
m_z''	±10″,3	±9,″0	±6″,0	±8″,1	±2″,9	±11″,0
Переменно						
k	—0,358	—0,125	—0,276	+0,056	+0,151	±0,311
n	8	5	9	17	28	17
m_k	±0,190	±0,097	±0,165	±0,191	±0,056	±0,324
m_z''	±8″,7	±4″.5	±7″.6	±8″,8	±2″,5	±14″,9
Облачно						
k	—0,025	—0,116	—0,040	+0,114	+0,169	+0,235
n	16	11	7	14	58	17
m_k	±0,070	±0,109	±0,131	±0,124	±0,048	±0,180
m_z''	±3″,2	±5″,0	±6″,0	±5″,7	±2″,2	±8″,3

В табл. 4, 5, 6 приведены средние коэффициенты рефракции, средние квадратические ошибки одного определения коэффициента и средние квадратические ошибки измеренного зенитного расстояния одним при-

емом, выведенные для среднего расстояния, данного во второй графе каждой таблицы.

Таблица 5

Сравнение точности измерения зенитных расстояний при $h_{эср}=21$ *м*

Период	12	14	16	18	С. И. В.	$\frac{dT}{dh}=0$
$h_{эср}=21$ *м* (5—30) $S_{ср}=4{,}1$ *км* (2—7)						
Ясно						
k	+0,074	+0,046	+0,080	+0,142	+0,163	+0,138
n	45	52	34	49	73	52
m_k	±0,066	±0,084	±0,070	±0,070	±0,030	±0,052
m''_z	±4″,4	±5″,6	±4″,7	±4,″7	±2″,0	±3″,5
Переменно						
k	+0,075	+0,078	+0,121	+0,148	+0,161	+0,152
n	11	16	25	32	44	43
m_k	±0,066	±0,046	±0,049	±0,056	±0,036	±0,088
m''_z	±4″,4	±3″,1	±3″,3	±3″,8	±2″,4	±5″,9
Облачно						
k	+0,105	+0,126	+0,130	+0,168	+0,161	+0,166
n	8	9	10	13	34	16
m_k	±0,062	±0,052	±0,050	±0,040	±0,024	±0,068
m''_z	±4″,2	±3″,5	±3″,4	±2″,7	±1″,6	±4″,5

Таблица 6

Сравнение точности измерения зенитных расстояний при $h_{эср}=38$ *м*

Период	12	14	16	18	С. И. В.	$\frac{dT}{dh}=0$
$h_{эср}=38$ *м* (30—60) $S_{ср}=10{,}8$ *км* (9—20)						
Ясно						
k	+0,124	+0,121	+0,138	+0,169	+0,159	+0,167
n	43	46	44	51	69	27
m_k	±0,029	±0,028	±0,021	±0,029	±0,011	±0,037
m''_z	±5″,1	±5″,0	±3″,7	±5″,1	±2″,0	±6″,6
Переменно						
k	+0,141	+0,135	+0,149	+0,168	+0,159	+0,150
n	12	15	14	22	24	8
m_k	±0,016	±0,022	±0,014	±0,026	±0,014	±0,014
m''_z	±2,″8	±3,″9	±2,″4	±4″,6	±2″,4	±2″,4
Облачно						
k	—	—	+0,156	+0,177	+0,158	+0,195
n	—	—	8	9	19	6
m_k	—	—	±0,012	±0,022	±0,012	±0,015
m''_z	—	—	±2″,1	±3″,9	±2″,1	±2″,7

Эти данные приведены для времени 12, 14, 16, 18 часов, для периода спокойных изображений при ветре и в моменты, когда вертикальный градиент температуры в точке наблюдения равен нулю.

Результаты табл. 4 даны для высотного интервала $h_э = 3{,}1—4{,}5$ *м* при среднем расстоянии $S_{ср} = 3{,}0$ *км*, табл. 5 — для $h_э = 5—30$ *м*, $S_{ср} = 4{,}1$ *км* и табл. 6 для $h_э = 30—60$ *м*, $S_{ср} = 10{,}8$ *км*.

Как видно из приведенных результатов, в периоды спокойных изображений при ветре величины коэффициентов рефракции и точность измерения зенитных расстояний не зависят ни от расстояния, ни от высоты прохождения визирного луча, ни от условий погоды и остаются постоянными в пределах точности их определений. Однако при наблюдении в ясную погоду линий нивелирования с эквивалентными высотами, меньше 5 *м*, возможно некоторое понижение точности измерения зенитных расстояний (см. табл. 4). Такое уменьшение точности измерений на незначительных высотах объясняется в основном плохими видимостями.

В дневные моменты и при нулевом градиенте температуры величины коэффициентов рефракции и точность измерения зенитных расстояний зависят от условий погоды и от высоты прохождения визирного луча над поверхностью земли. Причем точность измерения зенитных расстояний может оказаться в 4 раза грубее соответствующей точности в период спокойных изображений при ветре. С увеличением высот лучей визирования эффект повышения точности измерения зенитных расстояний в периоды спокойных изображений при ветре уменьшается, однако и при наблюдении линий нивелирования с эквивалентными высотами больше 30 *м* точность повышается в среднем в два раза (см. табл. 6).

С целью определения точности зенитных расстояний, измеренных в период спокойных изображений при ветре, нами обработан весь материал наблюдений зенитных расстояний триангуляционной сети, образующей 51 треугольник. Как указывалось выше, продолжительность измерений на каждом пункте составляла 2—5 дней, поэтому можно было получить по три независимые невязки превышений для каждого треугольника сети. Невязки вычислены по превышениям, полученным из одного приема прямого и обратного зенитного расстояния.

Распределение невязок по величине и знаку показано в табл. 7.

Таблица 7

Распределение невязок

Интервал невязок в *м*	Количество невязок			
	Период спокойных изображений при ветре		14 часов	
	+	—	+	—
0,60—0,80	—	—	1	1
0,40—0,60	—	—	5	5
0,30—0,40	1	—	5	7
0,20—0,30	3	1	6	17
0,10—0,20	13	18	25	26
0—0,10	65	52	22	33

По невязкам треугольников получена средняя квадратическая ошибка измеренного зенитного расстояния:

$$m_z^{\circ} = \frac{m_h \cdot \rho''}{10\,000} \sqrt{2}, \qquad (1)$$

где m_h — средняя квадратическая ошибка превышения, полученного из двухстороннего геодезического нивелирования для расстояния 10 *км*.

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{[PWW]}{N}}, \quad P = \frac{100}{\Sigma S^2}. \qquad (2)$$

Здесь: W — невязка превышений;
N — количество невязок;
P — вес невязок превышений;
ΣS^2 — сумма квадратов сторон треугольника.

Результаты обработки приведены в табл. 8, в которой μ_z'' — средняя квадратическая ошибка измеренного зенитного расстояния одним приемом, полученная по разностям MZ из смежных приемов.

Таблица 8

Точность измерения зенитных расстояний

n	1	2	3
Период спокойных изображений при ветре			
m_h	±0,064	±0,048	±0,044
m_z''	±1″,87	±1″,41	±1″,28
N	153	51	51
μ_z''	+1″,6		
14 часов			
m_h	±0,129	±0,107	±0,099
m_z''	±3″,78	±3″,14	±2″,90
N	153	51	51
μ_z''	±2″,2		

В первом столбце таблицы m_h и m_z'' получены по результатам, вычисленным из одного приема, во втором — среднее из двух и в третьем — среднее из трех приемов измеренных зенитных расстояний.

Анализируя эти результаты, приходим к выводу, что средняя квадратическая ошибка измеренных зенитных расстояний в периоды спокойных изображений при ветре в два раза меньше соответствующей ошибки для 14 часов и равна для одного измеренного приема ±1″,87.

Различие между величинами m_z'' и μ_z'' вызвано систематическими инструментальными погрешностями, личными ошибками наблюдателей, ошибками измерения высот знаков, изменением уклонений отвеса от пункта к пункту и т. д. Как показано [2], суммарное влияние двух первых ошибок может достигнуть ±0,9.

Таким образом, полученная точность измеренных зенитных расстояний в периоды спокойных изображений не дает оснований утверждать о наличии ошибок рефракционного характера в результатах измерений.

Наконец, следует заметить, что хорошие результаты получаются не только в периоды совершенно спокойных изображений при ветре, но и в периоды наилучших утренних и вечерних видимостей при наличии ветра, когда колебания изображений незначительны. Поэтому

в обработку были включены все результаты измерений, полученные в эти периоды.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. В периоды спокойных изображений при ветре поле вертикального градиента показателя преломления света в приземном слое воздуха близко к однородному. Величина коэффициента рефракции в эти периоды остается практически постоянной в диапазоне скорости ветра 0,5—7 *м/сек*. В интервале скорости ветра 0—0,5 *м/сек* при спокойных изображениях возможна значительная неоднородность рефракционного поля, вызванная инверсией температуры.

2. В дневные периоды 12—16 часов величина коэффициента рефракции получилась минимальной при скорости ветра 3—5 *м/сек*, с увеличением и уменьшением скорости ветра замечается увеличение коэффициента рефракции.

3. В периоды спокойных изображений при ветре величина коэффициента рефракции практически не зависит от условий погоды, высоты прохождения визирного луча в диапазоне 3—60 *м* и температуры в интервале 10—26°.

4. Средний коэффициент рефракции в эти периоды равен +0,161 с ошибкой среднего значения ±0,001.

5. Точность измерения зенитных расстояний при наблюдении в приземном слое атмосферы в периоды спокойных изображений при ветре (по сравнению с другими периодами) увеличивается в 2—4 раза.

Точность измеренного одним приемом зенитного расстояния равна ±1″,87.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Джуман. К вопросу о выгоднейшем времени измерения зенитных расстояний. Геодезия, картография и аэрофотосъемка, вып. 1. Межведомственный республиканский научно-технический сборник. Изд-во Львовского ун-та, 1964.

2. А. А. Изотов и Л. П. Пеллинен. Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования. Труды ЦНИИГАиК, вып. 102, М., 1955.

3. Л. С. Хижак. Связь между колебаниями изображений и ошибками углов рефракционного происхождения. Геодезия, картография и аэрофотосъемка, вып. 1. Межведомственный республиканский научно-технический сборник. Изд-во Львовского ун-та, 1964.

Работа поступила
20 ноября 1965 г.