

УДК 528.024.4

С. Г. ВЛАСЕНКО, Н. И. КРАВЦОВ

ОСОБЕННОСТИ ДНЕВНОГО ХОДА КОЭФФИЦИЕНТА РЕФРАКЦИИ  
В ГОРНО-ДОЛИННОМ РАЙОНЕ КАРПАТ

Известно, что характер зависимости коэффициента рефракции от времени, условий погоды, высоты прохождения визирного луча над подстилающей поверхностью и других факторов изменяется в различных физико-географических условиях по-разному.

В сентябре 1970 года мы выполнили экспериментальные работы по измерению зенитных расстояний, чтобы изучить особенности дневного хода коэффициента рефракции в горно-долинном районе Карпат. В административном отношении участок работ находится на территории Свалявского и Воловецкого районов Закарпатской области. Северную часть участка занимает Полонинский хребет (пункты С и Р), южную — Вулканический хребет (пункты Б и Д). Пункты П и Н расположены в районе Березне-Липшанского междугорья, переходящего на западе в Свалявскую долину размерами  $5 \times 7$  км. Особая геоморфологическая форма участка (междугорье и долина), выходы скальных пород, глубокие ущелья, горно-долинные ветры приводят к образованию в этом районе своеобразных рефракционных полей. Пункты сети расположены на открытых горных вершинах.

Измерения зенитных расстояний производились одновременно с пунктов П и С, причем вначале измерялись взаимные зенитные расстояния между этими пунктами, а затем зенитные расстояния на пункты Б, Д, Н, Р.

Наблюдения велись в период с 1 по 15 сентября в течение светлого времени суток через каждый час оптическими теодолитами ОТ-02 четырьмя приемами с наведением средней нити на верх визирной цели. Всего было выполнено свыше 800 приемов наблюдений. Для каждой часовой серии наблюдений фиксировалось состояние погоды, облачность, условия видимости, качество изображений. В начале и в конце каждой серии наблюдений измерялось давление воздуха и определялись аспирационными психрометрами температура и влажность воздуха на высоте 1 м от поверхности земли и на высоте инструмента (на пункте С — 4, на пункте П — 11 м).

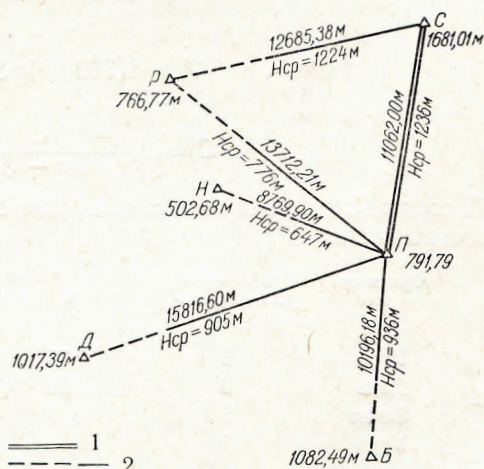


Рис. 1. Схема сети триангуляции:

- 1 — одновременные двухсторонние наблюдения;  
2 — односторонние наблюдения.

В период наблюдений удерживалась устойчивая пасмурная погода, температура колебалась от 8 до 15° на пункте П, и от 0 до 10° на пункте С. Столь значительное различие температур вызвано большой разностью высот пунктов.

Для характеристики точности измеренных зенитных расстояний по результатам полевых наблюдений используем колебания места зенита по всем направлениям в серии приемов. Вычислим средние квадратические ошибки измеренного зенитного расстояния по формуле

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \quad (1)$$

где  $v$  — уклонение отдельных значений места зенита от среднего арифметического из всех приемов на каждый час наблюдений по всем направлениям.

Для суждения о точности измерения зенитных расстояний в различные периоды суток используем методы математической статистики. Средние квадратические ошибки измерения зенитных расстояний на пункты П и С были разбиты на три группы по видимостям — утренняя, дневная, вечерняя. В каждую видимость включены 5—6 часовых и получасовых серий наблюдений. Значимость различия полученных шести дисперсий оценим с помощью критерия Бартлета [3]. Формулы для вычислений:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k f_i S_i^2}{f}; \quad f = \sum_{i=1}^k f_i. \quad (2)$$

$$B = 2,303 \left( f \lg S^2 - \sum_{i=1}^k f_i \lg S_i^2 \right). \quad (3)$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left( \sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right). \quad (4)$$

Исходные данные и вычисления для оценки точности (пункты П и С) приведены ниже:

	Время суток	Количество степеней свободы	Дисперсии				$\frac{1}{f_i}$
			$S_i^2$	$f_i S_i^2$	$\lg S_i^2$	$f_i \lg S_i^2$	
П	Утро	5	0,33	1,65	1,5185	3,5925	0,2000
	День	6	0,30	1,80	1,4771	4,8626	0,1666
	Вечер	5	0,15	0,75	1,1761	5,8805	0,2000
С	Утро	5	0,08	0,40	2,9031	6,5155	0,2000
	День	6	0,02	0,12	2,3010	11,8060	0,1666
	Вечер	5	0,21	1,05	1,3222	4,6110	0,2000

$$S^2 = 0,1804; \quad \lg S^2 = \bar{1},2562; \quad f \lg S^2 = \bar{24},1984;$$

$$\frac{1}{f} = 0,0312; \quad B = 11,3545; \quad C = 1,0073;$$

$$\frac{B}{C} = 11,2722.$$

Сравним полученное отношение  $\frac{B}{C}$  с величиной квантиля  $\chi_{0,98}^2$ . При числе степеней свободы  $f = 5 \chi_{0,98}^2 = 13,4$ . Так как  $\frac{B}{C} < \chi_{0,98}^2$ , то можно сделать вывод, что при заданном уровне значимости все шесть дисперсий являются дисперсиями одного порядка, то есть в горно-долинном районе осеню периоды наблюдений не различаются по точности.

Как указывалось выше, на величину коэффициента рефракции существенное влияние оказывает вертикальный температурный градиент воздуха  $\gamma$ . Остановимся на характере его изменения в районе работ. Величина вертикального температурного градиента определялась дважды:

1. По измерениям температуры на одном пункте (локальный градиент)

$$\gamma = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{h}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{в}}$  — показание верхнего термометра;  $t_{\text{н}}$  — показание нижнего термометра;  $h$  — превышение между термометрами.

2. С использованием разности температур, измеренных одновременно на концах линии нивелирования (общий градиент)

$$\gamma' = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\Delta H}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{в}}$  — температура на уровне инструмента на верхнем пункте;  $t_{\text{н}}$  — то же на нижнем пункте;  $\Delta H$  — разность отметок инструментов, установленных на разных пунктах. По вычисленным значениям  $\gamma$  и  $\gamma'$  построены графики. Согласно графикам (рис. 2), дневной ход локальных вертикальных температурных градиентов на пунктах  $\Pi$  и  $\text{С}$  в горном районе аналогичен дневному ходу его для холмистой и равнинной местности. Утром с 7 до 10 часов происходит быстрое изменение от положительных значений (при инверсии) до максимальных отрицательных (при нормальной стратификации). Обратный переход происходит во второй половине дня с 16 до 20 часов. В середине дня с 10 до 16 часов величина градиента изменяется мало. Моменты изотермии наступают утром около 8 часов, вечером — около 19 часов.

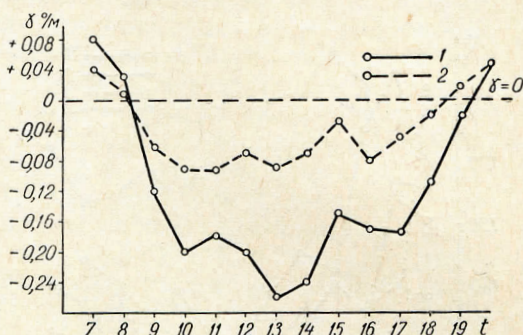


Рис. 2. Дневной ход вертикального температурного градиента:

1 — на пункте  $\text{С}$ ; 2 — на пункте  $\Pi$ .

График дневной изменчивости общего градиента  $\gamma'$ , вычисленного по значениям температур на высоте инструмента на верхнем и нижнем пунктах, указывает на постоянную общую нормальную стратификацию воздуха вдоль линии наблюдения (рис. 3). Можно предположить, что частные случаи изменения вертикального температурного градиента  $\gamma$  происходят над пунктами в относительно небольших по высоте слоях воздуха по сравнению с общей разностью высот пунктов. Общий градиент  $\gamma'$  изменяется незначительно, если сравнить с локальными градиентами на пунктах  $\Pi$  и  $\text{С}$ . Он имеет тенденцию к уменьшению в течение дня, несколько увеличиваясь в вечерние часы.

Рис. 3. Дневной ход общего вертикального температурного градиента по линии  $\Pi$ — $\text{С}$ .

В работах [1, 2] указывается на зависимость коэффициента рефракции от высоты прохождения луча над уровнем моря. Для исследования этой зависимости в условиях горно-долинного района Карпат для всех линий были вычислены средние высоты прохождения луча над уровнем моря  $H_{\text{ср}}$ . Значения вычисленных  $H_{\text{ср}}$  приведены на схеме (рис. 1). По вычисленным средним высотам и характеру профилей все линии наблюдений разбиваются на три группы: I группа — линии  $\Pi$ — $\text{Н}$ ,  $\Pi$ — $\text{Р}$ . Средние высоты равны соответственно 647 и 776 м над уровнем моря. Разность высот точек невелика, луч проходит по обоим направлениям на высоте от 30 до 150 м над подстилающей поверхностью, представленной в основном смешанным лесом. II группа — линии  $\Pi$ — $\text{Б}$ ,  $\Pi$ — $\text{Д}$ . Средние высоты прохождения луча над уровнем моря равны 936 и 905 м соответственно. Профили

линий симметричны. Разность высот конечных точек 200—250 м. Однако луч проходит в среднем на высоте 400—500 м над подстилающей поверхностью, представляющей лесом и незалесенными склонами гор у пунктов Б и Д. III группа — линии П—С, Р—С. Средние высоты равны соответственно 1236 и 1224 м. Профиль линии асимметричен, разность высот конечных точек до 900 м. Высота луча над подстилающей поверхностью изменяется от 100 м у пунктов до 500 м в средней части линии.

Луч проходит над лесом и незалесенными склонами гор.

Для анализа дневной изменчивости коэффициента рефракции в горно-долинном районе Карпат и его зависимости от средней высоты луча над уровнем моря были вычислены значения коэффициента по известной формуле. При вычислении коэффициента рефракции вводились поправки за влияние уклонов отвесных линий и за непараллельность уровневых поверхностей. Для вычисления гравиметрических поправок использовался метод косвенной интерполяции, согласно которому аномалии силы тяжести в каждой точке разделяют на гипсометрическую часть (редукцию Буге) и остаточную часть (аномалию Буге) в соответствии с формулой

$$g - \gamma = \Delta g_B + cH, \quad (7)$$

где  $g - \gamma$  — искомые аномалии с

редукцией в свободном воздухе;  $\Delta g_B$  — аномалии Буге;  $H$  — высота точки, м;  $c$  — постоянный коэффициент.

Почасовые коэффициенты рефракции, вычисленные по результатам наблюдений для каждого направления, были осреднены на каждый час наблюдений и по средним значениям построены графики (рис. 4).

Как показывают графики, в горно-долинном районе на линиях со средней высотой луча над уровнем моря около 700 м (линии I группы) амплитуда дневных колебаний коэффициента рефракции значительна, а дневной ход по характеру аналогичен ходу коэффициента в холмистой местности. На линиях с асимметричными профилями, большой разностью высот конечных точек и средними высотами порядка 1200 м (линии III группы) кривая дневного хода представляет собой синусоиду с одним максимумом (около 10 часов утра) и одним минимумом (около 17 часов). На линиях с симметричными профилями и средними высотами порядка 900 м (линии II группы) утренний максимум наступает раньше (8 часов), чем на линиях с асимметричными профилями и  $H_{\text{ср}} = 1200$  м. Дневной ход  $K$  более сглажен. Из графиков также видно, что с увеличением средней высоты дневная амплитуда величины  $K$  уменьшается, а абсолютные значения коэффициентов рефракции несколько увеличиваются.

Что касается времени наступления утреннего максимума, то оно зависит от средней высоты луча над уровнем моря и от высоты прогревания атмосферы в утренние часы. Чем выше средняя высота луча над уровнем моря, тем позже наступает утренний максимум, и зависит он от скорости прогревания атмосферы от земной поверхности вверх. По-видимому, в летнее время утренний максимум по всем линиям будет наступать быстрее.

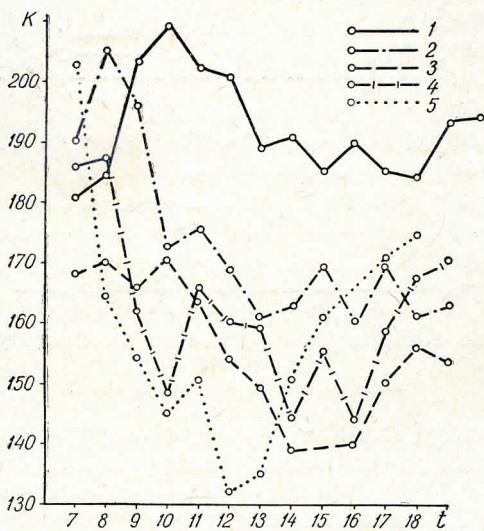


Рис. 4. Дневной ход коэффициента рефракции по направлениям:

1 — П—С; 2 — П—Д; 3 — П—Б; 4 — П—Р;  
5 — П—Н.

Чтобы определить, в какой степени коэффициент рефракции  $K'$ , вычисленный по измеренным метеоэлементам на пунктах, может характеризовать коэффициент рефракции, полученный по измеренным зенитным расстояниям, были вычислены коэффициенты  $K'$  по известной формуле Иордана. Результаты вычислений значений коэффициентов  $K$  и  $K'$ , осредненные на каждый час наблюдений, приведены в таблице. Для вычислений по формуле Иордана использован общий температурный градиент  $\gamma'$ , полученный по метеоэлементам, измеренным на высоте инструмента в конечных точках линии. Локальные температурные градиенты  $\gamma$ , определенные на каждом пункте, не выражают общие изменения температуры вдоль визирного луча, давая локальное изменение температуры в точке измерения. По своей абсолютной величине коэффициенты рефракции  $K'$ , вычисленные с использованием локальных градиентов температуры  $\gamma$ , не соответствуют значениям коэффициентов, вычисленным по измеренным зенитным расстояниям. Общий температурный градиент в горно-долинных условиях больше соответствует действительному распределению температуры воздуха с высотой вдоль линии наблюдения. Естественно предположить, что если бы мы имели измерения метеорологических элементов не только на концах линии измерения, а в нескольких точках траектории и по ним вычислили коэффициент рефракции, то он был бы близок к среднеинтегральному значению.

Коэффициенты рефракции

Время дня	Направление П—С		Направление С—П	
	$K'$	$K$	$K'$	$K$
7	0,160	0,179	0,156	0,168
8	0,156	0,183	0,152	0,181
9	0,160	0,183	0,156	0,188
10	0,160	0,186	0,156	0,192
11	0,157	0,182	0,153	0,183
12	0,156	0,180	0,152	0,179
13	0,154	0,168	0,151	0,171
14	0,149	0,171	0,145	0,177
15	0,148	0,164	0,144	0,175
16	0,149	0,170	0,145	0,163
17	0,145	0,164	0,141	0,167
18	0,141	0,165	0,138	0,154
19	0,144	0,173	0,141	0,176
20	0,145	0,187	0,141	0,200

Чтобы проверить наличие корреляционной связи между  $K$  и  $K'$  по данным таблицы были вычислены для каждого пункта в отдельности коэффициенты корреляции

$$r_{KK'} = \frac{C_{KK'}}{\sigma_K \sigma_{K'}}, \quad (8)$$

где

$$\sigma_{K'} = \pm \sqrt{[\Delta K'^2]}; \quad \sigma_K = \sqrt{[\Delta K^2]}; \quad (9)$$

$$C_{KK'} = [\Delta K \cdot \Delta K'],$$

где  $\Delta K$ ,  $\Delta K'$  — отклонение вычисленных значений  $K$ ,  $K'$  от среднеарифметического.

Коэффициенты корреляции, вычисленные по формуле (8), для пункта П равны 0,48, для пункта С — 0,31, что позволяет сделать вывод об отсутствии корреляционной связи между этими двумя величинами. Таким образом, коэффициент рефракции, вычисленный по формуле Иордана в горно-долинном районе, не может характеризовать коэффициент  $K$ , вычисленный по измеренным зенитным расстояниям.

Итак:

1. В горно-долинном районе на линиях со средней высотой луча около 700 м над уровнем моря дневной ход  $K$  по характеру аналогичен ходу коэффициента рефракции в холмистой местности.

2. На линиях с симметричными профилями и средними высотами визирования порядка 900 м над уровнем моря коэффициент рефракции после восхода Солнца несколько увеличивается, достигая максимума около 8 часов утра, затем резко уменьшается, стабилизируясь в послеполуденный период. За час до захода Солнца он снова начинает возрастать.

3. На линиях с асимметричными профилями, большой разностью высот конечных точек и средними высотами визирования около 1200 м над уровнем моря кривая дневного хода коэффициента представляет собой хорошо выраженную синусоиду. Утренний максимум наступает несколько позже, чем на линиях предыдущей группы (10 часов).

4. В осенний период в горно-долинном районе Карпат при пасмурной погоде с ветром и нормальной стратификации воздуха измерения зенитных расстояний в различные периоды дня равноточны, но, учитывая дневной ход коэффициента, следует отдать предпочтение послеполуденным измерениям, когда значения коэффициента более стабильны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. Тр. ЦНИИГАиК, вып. 102, М., 1955.

2. Маслич Д. И. О точности геодезического нивелирования в горных условиях. Львов, 1957.

3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. «Наука», М., 1968.

Работа поступила 7 апреля 1971 года.  
Рекомендована кафедрой геодезии  
Львовского политехнического института.

---