

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 5×7 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).

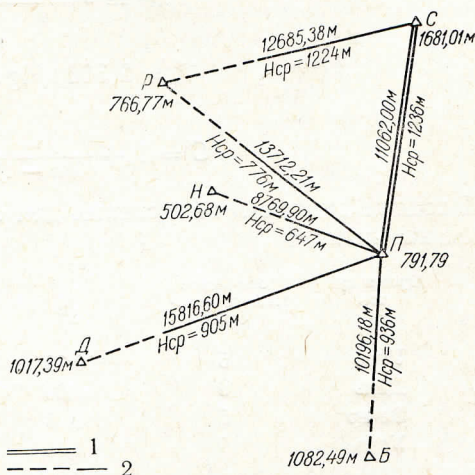


Рис. 1. Схема сети триангуляции:

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

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

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 полчасовых 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 | | | | |
|---|-------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| | | | S_i^2 | $f_i S_i^2$ | $\lg S_i^2$ | $f_i \lg S_i^2$ | $\frac{1}{f_i}$ |
| 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 |

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

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

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

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 γ . Остановимся на характере его изменения в районе работ. Величина вертикального температурного градиента определялась дважды:

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

$$\gamma = \frac{t_B - t_H}{h}, \quad (5)$$

где t_B — показание верхнего термометра; t_H — показание нижнего термометра; h — превышение между термометрами.

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

$$\gamma' = \frac{t_B - t_H}{\Delta H}, \quad (6)$$

где t_B — температура на уровне инструмента на верхнем пункте; t_H — то же на нижнем пункте; ΔH — разность отметок инструментов, установленных на разных пунктах. По вычисленным значениям γ и γ' построены графики. Согласно графикам (рис. 2), дневной ход локальных вертикальных температурных градиентов на пунктах П и 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.

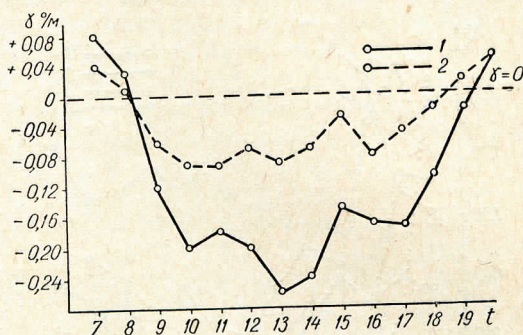


Рис. 2. Дневной ход вертикального температурного градиента:

1 — на пункте С; 2 — на пункте П.

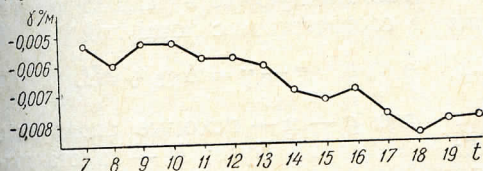


Рис. 3. Дневной ход общего вертикального температурного градиента по линии П—С.

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 γ происходят над пунктами в относительно небольших по высоте слоях воздуха по сравнению с общей разностью высот пунктов. Общий градиент γ' изменяется незначительно, если сравнить с локальными градиентами на пунктах П и С. Он имеет тенденцию к уменьшению в течение дня, несколько увеличиваясь в вечерние часы.

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 $H_{ср}$. Значения вычисленных $H_{ср}$ приведены на схеме (рис. 1). По вычисленным средним высотам и характеру профилей все линии наблюдений разбиваются на три группы: I группа — линии П—Н, П—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 П—Б, П—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, представленной 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.

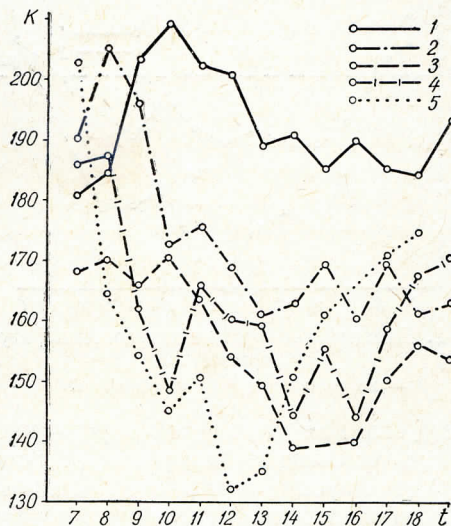
Луч проходит над лесом и незалесенными склонами гор.

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 отклонений отвесных линий и за непараллельность уровенных 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

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

Рис. 4. Дневной ход коэффициента рефракции по направлениям:

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



где $g - \gamma$ — искомые аномалии с редукцией в свободном воздухе; Δg_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.

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 γ' , полученный по метеоэлементам, измеренным на высоте инструмента в конечных точках линии. Локальные температурные градиенты γ , 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 γ , 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 | | |
| 8 | 0,156 | 0,183 | 0,156 | 0,168 |
| 9 | 0,160 | 0,183 | 0,152 | 0,181 |
| 10 | 0,160 | 0,186 | 0,156 | 0,188 |
| 11 | 0,157 | 0,182 | 0,156 | 0,192 |
| 12 | 0,156 | 0,180 | 0,153 | 0,183 |
| 13 | 0,154 | 0,168 | 0,152 | 0,179 |
| 14 | 0,149 | 0,171 | 0,151 | 0,171 |
| 15 | 0,148 | 0,164 | 0,145 | 0,177 |
| 16 | 0,149 | 0,170 | 0,144 | 0,175 |
| 17 | 0,145 | 0,164 | 0,145 | 0,163 |
| 18 | 0,141 | 0,165 | 0,141 | 0,167 |
| 19 | 0,144 | 0,173 | 0,138 | 0,154 |
| 20 | 0,145 | 0,187 | 0,141 | 0,176 |
| | | | | 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 ΔK , $\Delta K'$ — 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.
