

*Б. М. ДЖУМАН*, канд. техн. наук,  
Львовский политехнический институт,  
*И. С. МАТЯШУК*,

Украинский институт инженеров водного хозяйства,  
*А. Л. ОСТРОВСКИЙ*, д-р техн. наук,  
Львовский политехнический институт

## НОВЫЙ МЕТОД УЧЕТА АТМОСФЕРНЫХ ВЛИЯНИЙ ПРИ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

XV генеральная ассамблея МГГС (Москва, 1971) рекомендует наряду с разработкой дисперсионных методов определения среднеинтегрального значения показателя преломления  $n$  вести исследования по его определению посредством измерений зенитных расстояний, выполняемых одновременно со светодальномерными определениями.

Рассмотрим один из возможных методов определения  $n$  с использованием измеренных зенитных расстояний и коэффициента рефракции.

Как известно [3],

$$\frac{1}{R_c} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \sin z, \quad (1)$$

где  $R_c$  — радиус световой кривой;  $n$  — показатель преломления воздуха в некоторой точке;  $\frac{dn}{dh}$  — вертикальный градиент показателя преломления;  $z$  — измеренное зенитное расстояние. Так как при  $z=90^\circ \pm 6^\circ$ ,  $\sin z \approx 1$  и  $n \approx 1$ , то с достаточно высокой точностью можно положить

$$\frac{1}{R_c} = -\frac{dn}{dh}. \quad (2)$$

Отметим, что

$$R_c = \frac{R_3}{k}. \quad (3)$$

Здесь  $R_3$  — радиус Земли;  $k$  — точечный коэффициент вертикальной рефракции. На основании формул (2) и (3) имеем

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{k}{R_3}. \quad (4)$$

Таким образом, вертикальный градиент показателя преломления пропорционален коэффициенту вертикальной рефракции, причем кривизна Земли  $1/R_3$  является коэффициентом пропорциональности. Коэффициент рефракции, определяемый из

одновременных измерений зенитных расстояний, — среднеинтегральный [4], т. е.

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2} + \frac{1}{S} \int_0^S k dS. \quad (5)$$

Здесь  $S$  — длина линии между пунктами 1, 2;  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты рефракции, полученные на этих пунктах по измеренным односторонним зенитным расстояниям.

Заметим, что  $\bar{k}$  можно найти и при отсутствии высот пунктов 1, 2. Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определяют по зенитным расстояниям только при наличии высот пунктов 1 и 2.

На основании исследований Изотова-Пеллинина [2] представим коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  формулами:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= k_0 + \frac{qc}{h_{э1}}; \\ k_2 &= k_0 + \frac{qc}{h_{э2}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В этих формулах  $k_0$  — коэффициент рефракции при равновесной атмосфере;

$$q = 668,7 \cdot \frac{P}{T^2}, \quad (7)$$

где  $P$  — давление воздуха, мм рт. ст.,  $T$  — абсолютная температура воздуха;  $c$  — аномальная часть градиента температуры на высоте 1 м над подстилающей поверхностью;  $h_{э1}$  и  $h_{э2}$  — эквивалентные высоты по линиям 1—2 и 2—1.

Принимая  $k_0 = 0,15$  [5], получаем средний интегральный коэффициент рефракции по формулам (6)

$$\bar{k} = 0,15 + \frac{qc}{h}. \quad (8)$$

Здесь

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{h_{э1}} + \frac{1}{h_{э2}} \right) = \frac{h_{э1} + h_{э2}}{2h_{э1} \cdot h_{э2}}. \quad (9)$$

Если значение  $\bar{k}$  найдено из одновременных со светодальномерными измерениями взаимных определений зенитных расстояний и, кроме того, у приемопередатчика и отражателя велись измерения давления  $P_1$ ,  $P_2$ , температуры  $T_1$  и  $T_2$ , то  $q$  можно вычислить по формуле (7). При этом примем

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad P = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

Оценим точность такого определения  $q$ . Дифференцируя формулу (7) и переходя к средним квадратическим ошибкам, получаем:

$$M_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial P}\right)^2 \cdot m_P^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)^2 \cdot m_T^2. \quad (10)$$

Полагая в пределе  $m_P = \pm 10$  мм рт. ст. и  $m_T = \pm 10^\circ \text{C}$ , (при  $T = 300^\circ$  и  $P = 760$  мм), определяем  $M_q = \pm 0,4$ .

Следовательно, даже в таких мало вероятных условиях погрешность  $q$  составит приблизительно 7%, что при  $h_{31} = h_{32} = 10$  м соответствует определению  $\bar{k}$  с точностью порядка  $\pm 0,01$ . При  $h_3 > 10$  м эта погрешность определения  $\bar{k}$  будет еще меньше. Величину  $1/h$  можно вычислить на основании профиля по линии 1—2, составленного по карте. Таким образом, неизвестным в формуле (8) остается  $c$  — аномальный градиент температуры на высоте 1 м над подстилающей поверхностью.

Из этой формулы определим:

$$c = (\bar{k} - 0,15) \frac{h}{q}. \quad (11)$$

Теперь для некоторой точки  $i$  на высоте  $h_i$  запишем формулу точечного коэффициента рефракции

$$k_i = 0,15 + \frac{qc}{h_i}. \quad (12)$$

Формула (12) выражает закон изменения коэффициента рефракции с высотой.

На основании метеорологических данных, измеренных по концам определяемой линии, можно вычислить средний показатель преломления

$$n_{\text{ср}} = \frac{n_1 + n_2}{2}, \quad (13)$$

который следует отнести к высоте  $h_0$ , равной полусумме высот приемопередатчика  $i_1$  и отражателя  $i_2$  над подстилающей поверхностью, т. е.

$$h_0 = \frac{i_1 + i_2}{2}. \quad (14)$$

Для перехода от  $n_{\text{ср}}$  к среднему интегральному значению показателя преломления  $\bar{n}$  необходимо ввести поправку  $\Delta n$ , равную изменению показателя преломления при переходе с уровня  $h_0$  на уровень средней высоты визирного луча над подстилающей поверхностью  $h_{\text{ср}}$ , определяемой также на основании профиля по линии 1—2.

Следовательно,

$$\bar{n} = n_{\text{ср}} + \Delta n, \quad (15)$$

причем

$$\Delta n = \int_{h_0}^{h_{\text{ср}}} \frac{dn}{dh} dh. \quad (16)$$

Формула (16) с учетом (4) и (12) принимает вид

$$\Delta n = -\frac{1}{R_3} \int_{h_0}^{h_{cp}} \left( 0,15 + \frac{qc}{h} \right) dh. \quad (17)$$

После интегрирования

$$\Delta n = -\frac{1}{R_3} [0,15 (h_{cp} - h_0) + qc (\ln h_{cp} - \ln h_0)]. \quad (18)$$

Перейдем от натуральных к десятичным логарифмам и окончательно получим

$$\Delta n = -\frac{1}{R_3} \left[ 0,15 (h_{cp} - h_0) + \frac{qc}{M} (\lg h_{cp} - \lg h_0) \right], \quad (19)$$

где  $M$  — модуль перехода, равный 0,43429. Если светодальномерные измерения обработаны обычно, т. е. в результаты измерений введена поправка за изменение скорости света в атмосфере по сравнению со скоростью в вакууме, причем использованы метеорологические данные, полученные по концам измеряемой линии, то для получения окончательного значения длины линии необходимо ввести дополнительную поправку за переход от  $n_{cp}$  к  $n$ . Для этого воспользуемся равенством

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta S}{S}. \quad (20)$$

Так как  $n \approx 1$ , то

$$\Delta S = \Delta n \cdot S. \quad (21)$$

Описанный выше метод определения поправок в показатель преломления для световых волн и в измеренную длину линии проверен экспериментально в работах, выполненных совместно отраслевой лабораторией Львовского политехнического института с ЦНИИГАНК в 1969 г. в горном районе Карпат.

Характеристика созданного в горах эталонного полигона дана в работе [1].

Для проверки метода в обработку были взяты только те линии, средние результаты наблюдений которых за отдельные ночи существенно различались. Основная причина — неодинаковые погодные условия в эти ночи. Результаты вычислений приведены в таблице.

Анализ экспериментальных данных показывает, что поправка значительна. Расхождения средних значений линий, измеренных в разные сутки, после введения поправок уменьшаются.

Следовательно, изложенный метод представляет несомненный интерес и заслуживает дальнейших исследований.

**Результаты светодальномерных измерений и введение поправок  
в длины линий за 1969 г.**

Дата	Время, ч, мин	$\bar{k}$	$h_{\text{ср.}}$ , мм	$S_{\text{изм. ср.}}$ , м	Поправка $\Delta S$ , мм	$S_{\text{испр. ср.}}$ , м	Расхождение до исправления, мм	Расхождение после исправления, мм
<b>Линия 1—4</b>								
10—11. VII.	23 18—04 02	0,143		12 383,870	+36	12 383,906		
11—12. VII.	23 08—01 02	0,149	162,5	12 383,879	+31	12 383,910	— 9	— 4
<b>Линия 1—2</b>								
16—17. VII.	23 37—03 08	0,178		12 617,445	+97	12 617,542		
28—29. VII.	1 00— 3 00	0,170	167,8	12 617,453	+83	12 617,536	— 8	+ 6
<b>Линия 1—7</b>								
21—22. VI.	23 55—02 03	0,201		10 940,503	+60	10 940,563		
23—24 VI.	23 36—04 16	0,210	93,1	10 940,494	+67	10 940,561	+ 9	+ 2
<b>Линия 5—6</b>								
2—3 . VIII.	23 48—02 22	0,103		10 225,787	—46	10 225,741		
3—4 . VIII.	22 49—00 24	0,093	258,7	10 225,829	—69	10 225,760	—42	—19
<b>Линия 1—6</b>								
28—29. V.	23 26—03 22	0,192		8 769,704	+50	8 769,754		
29—30. V.	23 58—01 12	0,160	105,0	8 769,726	+28	8 769,754	—22	0

**Список литературы:** 1. *Вировец Ю. Б., Наумов Я. В., Островский А. Л.* Эталонный геодезический полигон в горном районе. — Геодезия и картография, 1971, № 12. 2. *Пеллинен Л. П., Изотов А. А.* Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — Тр. ЦНИИГАиК, 1955, вып. 102. М. 3. *Островский А. Л.* Геодезические методы учета влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1965, вып. 3. 4. *Островский А. Л.* О геодезическом методе определения физических редукций светодальномерных измерений. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1970, вып. 12. 5. *Джуман Б. М.* Определение вертикального градиента температуры геодезическим методом при нейтральной стратификации в приземном слое воздуха. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1974, вып. 20.

Работа поступила 3 апреля 1978 года. Рекомендована кафедрой инженерной геодезии Украинского института инженеров водного хозяйства.