

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ КРИВОЙ

В настоящей работе приведены результаты анализа точности вычисления вертикальной рефракции электромагнитных волн (ЭМВ) оптического диапазона с использованием уравнения аппроксимирующей кривой [4] при измерении зенитных расстояний объектов, располагающихся на поверхности Земли.

Геодезические и метеорологические определения, применяемые для апробации формулы в [4], выполнены на пункте *Б* в г. Бережаны Тернопольской области 20—29 августа 1974 года.

В ходе экспериментальных исследований на пункте наблюдений теодолитом ОТ-02 измерялись односторонние зенитные расстояния по четырем направлениям, температура и влажность воздуха — на двух уровнях (1,4 и 9,4 м) психрометрами Асмана, атмосферное давление — барометром-анероидом на высоте угломерного прибора (1,4 м).

По результатам высокоточных светодальномерных измерений и геометрического нивелирования II класса, выполненных ранее на полигоне, согласно формуле геодезического нивелирования для каждого приема измерений вычислены значения зенитных расстояний для избранных направлений. При анализе точности использованы два наиболее протяженных направления ($B-A$) = 4034,50 м и ($B-Я$) = 5553,50 м.

Теоретические значения зенитных расстояний этих направлений составили соответственно $Z_{(B-A)} = 88^{\circ}46'19,17''$ и $Z_{(B-Я)} = 89^{\circ}07'14,58''$.

Для удобства обозначений и избежания двоякого толкования величин, входящих в формулы, в дальнейшем заменим в формуле из [4] P_0 на g_0 и запишем ее в виде

$$\delta = -\frac{\rho'' g_0 l}{2} \left(1 + \frac{q_0 l}{6} \right), \quad (1)$$

где g_0 , q_0 — вертикальный и горизонтальный градиенты показателя преломления.

Вертикальный градиент g_0 , входящий в (1), требует знания индексов вертикальной рефракции N на двух фиксированных уровнях.

Величиной q_0 вследствие ее малости можно пренебречь, поскольку температура и давление воздуха в горизонтальном направлении изменяются в сто—тысячу раз меньше, чем в вертикальном [1, 3].

Индексы рефракции N вычислялись для ЭМВ светового диапазона и длины волны $\lambda = 0,589$ мкм по формуле [2]

$$N = 104,85 \frac{P}{T} \left(1 - 0,132 \frac{e}{P} \right), \quad (2)$$

где T — абсолютная температура; P, e — давление и влажность воздуха, мм рт. ст.

При вычислении N по (2) за e принималось среднее для летнего периода значение влажности $e = 10$ мм рт. ст, что практически несущественно влияет на величину N [5].

Значение g_0 для зенитных расстояний $Z_{\text{изм}}$, измеренных в течение 18 ч каждой даты наблюдений, вычислено по формуле

$$g_0 = \frac{N_{\text{в}} - N_{\text{н}}}{h_{\text{в}} - h_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{в}}, N_{\text{н}}$ — индексы рефракции на верхнем и нижнем уровнях, $h_{\text{в}}, h_{\text{н}}$ — высоты уровней.

Рассчитанные по (1) углы рефракции δ вводили в измеренные зенитные расстояния $Z_{\text{изм}}$ по двум направлениям как поправки за вертикальную рефракцию

$$Z_{\text{исп}} = Z_{\text{изм}} + \delta. \quad (4)$$

Для выявления эффективности учета рефракции данным методом проведено сравнение исправленных и теоретических значений зенитных расстояний. Фактические ошибки учета вертикальной рефракции V для избранных направлений составляют

$$V = Z_{\text{исп}} - Z_{\text{т}}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{исп}}, Z_{\text{т}}$ — исправленные и теоретические значения зенитных расстояний.

Оценка точности учета вертикальной рефракции выполнена способом наименьших квадратов. Средние квадратические ошибки вычисляли по формуле

$$m_{\delta} = \sqrt{\frac{[VV]}{n-1}}. \quad (6)$$

Для направлений (Б—А) и (Б—Я) они составили соответственно

$$m_{\delta (Б-А)} = 2,4'' \text{ и } m_{\delta (Б-Я)} = 3,0''.$$

Полагая, что теоретические зенитные расстояния в рефракционном отношении безошибочны, при исследовании точности учета рефракции для каждого приема по измеренным и теоретическим зенитным расстояниям дополнительно рассчитаны углы рефракции

$$\sigma = Z_{\text{изм}} - Z_{\text{т}}. \quad (7)$$

По уклонениям углов рефракции, вычисленным для одних и тех же приемов измерений и направлений, получены ошибки рефракционных влияний ε из соотношения

$$\delta - \sigma = \varepsilon \quad (8)$$

Характеристики измерений и результатов вычислений

Дата наблю- дений	Метеорологические параметры										$Z_{T(B-A)} = 88^{\circ}46'19,17''$				$Z_{T(B-D)} = 89^{\circ}07'14,58''$			
	$t_{в}^{\circ}C$	$t_{н}^{\circ}C$	$P, мм рт. ст.$	$N_{в} \cdot 10^{-6}$	$N_{н} \cdot 10^{-6}$	$N_{в} - N_{н}$	$g_{0} \cdot 10^{-6}$ м-1	$Z_{изм}$	δ°	$Z_{исп}$	V°	σ°	ε''					
20.08	21,0	20,8	736,5	263,17	263,35	-0,18	-2,2	88 46 10,2	9,25	88 46 19,45	0,28	8,97	-0,28					
								89 06 58,0	13,02	89 08 11,02	3,56	16,58	3,58					
21.08	21,2	21,0	736,5	261,86	262,04	-0,18	-2,2	10,8	9,25	20,05	0,88	8,37	-0,88					
								57,6	13,02	10,62	3,96	16,98	3,96					
22.08	16,4	16,2	736,8	266,60	266,79	-0,19	-2,4	11,3	10,08	21,38	2,21	7,87	-2,21					
								59,2	13,95	13,15	1,43	15,38	1,42					
23.08	17,8	17,6	734,9	264,30	264,53	-0,23	-2,9	11,1	12,18	23,28	4,11	8,04	-4,11					
								07 00,2	16,79	16,99	2,41	14,38	-2,41					
24.08	18,7	18,6	734,9	264,53	264,63	-0,10	-1,2	12,7	5,04	17,74	1,43	6,47	1,43					
								05,5	7,22	12,72	1,86	9,08	1,88					
25.08	20,3	20,0	735,5	262,32	262,58	-0,26	-3,2	08,5	13,43	21,93	2,76	10,67	-2,76					
								06 56,1	18,52	14,62	0,04	18,48	-0,04					
27.08	19,8	19,5	734,9	262,55	262,82	-0,27	-3,3	08,4	13,43	21,83	2,66	10,77	-2,66					
								07 00,3	19,10	19,40	4,82	14,28	-4,82					
28.08	22,6	22,3	736,5	260,62	260,89	-0,27	-3,3	08,7	14,29	22,99	3,82	10,47	+3,82					
								06 56,5	19,10	16,18	1,60	17,50	+1,02					
29.08	22,0	21,8	737,9	262,55	261,80	-0,15	-2,0	12,4	6,29	18,69	0,48	6,77	-0,48					
								07 03,9	8,68	12,58	2,00	10,68	2,00					

и выполнена оценка точности учета рефракции по каждому направлению.

Средние квадратические ошибки получены по формуле

$$m_{\sigma} = \sqrt{\frac{[\varepsilon\varepsilon]}{n-1}}. \quad (9)$$

Значения ошибок составили для направления (Б—А) и (Б—Я) соответственно

$$m_{\sigma} = 2,65'' \quad \text{и} \quad m_{\sigma} = 3,04''.$$

Таким образом, мы получили идентичные значения ошибок за влияние вертикальной рефракции по обоим направлениям, что свидетельствует о достаточно полном учете рефракции предложенным методом [4].

Ошибки V , ε , значения измеренных $Z_{\text{изм}}$, исправленных $Z_{\text{исп}}$ и теоретических $Z_{\text{т}}$ зенитных расстояний, а также углов рефракции δ и σ приведены в таблице. При этом в числителе таблицы даны результаты для направления (Б—А), в знаменателе — для направления (Б—Я).

Из анализа ошибок m_{δ} и m_{σ} следует:

введение поправок δ , рассчитанных по (1), улучшает результаты измерений зенитных расстояний по обоим направлениям в среднем на 70%;

оценка точности учета рефракции исследована на результатах измерений, выполненных в примерно одинаковых погодноклиматических условиях, сохранявшихся на пункте в период наблюдений, — инверсионной температурной стратификации атмосферы. Такая неоднородность температурного поля вызывает неустойчивость структуры нижних слоев воздуха и создает неблагоприятные условия для измерений. При других стратификациях атмосферы надо ожидать, что результаты учета рефракции не должны быть хуже.

Исходя из многолетних и многочисленных исследований в области рефракции, по метеоданным, полученным в одной точке, нельзя судить о состоянии атмосферы и полноте учета рефракции на всем пути распространения ЭМВ. Здесь речь идет об учете нормальной части вертикальной рефракции в ближней к пункту наблюдения зоне оптического луча.

1. *Белинский В. А.* Динамическая метеорология. М.; Л.; 1948.
2. *Казанский К. В.* Земная рефракция над обширными водными пространствами. М., 1966.
3. *Матвеев Л. Т.* Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1965.
4. *Федорищев А. Е., Романюк С. М.* О вычислении поправки за вертикальную рефракцию посредством показателя преломления и уравнения аппроксимирующей кривой // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1985. Вып. 42. С. 86—90.
5. *Федорищев А. Е.* Исследование суточного хода вертикального градиента показателя преломления воздуха // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1986. Вып. 43. С. 104—106.

Статья поступила в редколлегию 01.11.85