

Н.Ф. Нелюбин

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛОТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ВЕЛИЧИНУ РЕФРАКЦИОННЫХ ПОПРАВОК

Для трехмерно-неоднородной атмосферы в широком диапазоне приземных температур и горизонтальных градиентов показателей преломления рассчитаны углы рефракции в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Из расчетов следует, что неучет горизонтальной неоднородности плотности атмосферы может привести к значительным систематическим ошибкам вычисленных значений рефракционных поправок.

В большинстве практических приложений теории рефракции атмосфера Земли считается сферически-симметричной, показатель преломления которой изменяется лишь по вертикали. В реальной атмосфере всегда существуют горизонтальные градиенты метеоэлементов, а следовательно, и показателя преломления Γ_N , при этом преобладающий вклад в величину Γ_N дает горизонтальный градиент температуры Γ_T (в оптическом диапазоне [1]). Обусловленные общим изменением температуры от полюсов к экватору глобальные значения Γ_T , полученные из аэрологического зондирования, составляют в зависимости от сезона и высоты над поверхностью Земли (0,3÷1,1) град/100 км [2].

Попытки учесть влияние горизонтальных градиентов при расчете углов рефракции и согласовать их с измеренными значениями не давали желаемого результата [3–5 и др.]. Причиной этого, по-видимому, является не только приближенный характер расчетных формул, но и малое пространственно-временное разрешение аэрологического зондирования и его недостаточная точность для определения Γ_T (или Γ_N). А это может привести к тому, что измеренные значения Γ_T будут отличаться от фактических вдоль линии визирования не только величиной, но и знаком, особенно в приземном слое атмосферы, где значения локальных градиентов Γ_T превосходят глобальные в десятки и более раз [1, 6].

Таблица 1

Приземная температура, °С	Зенитный угол, град								
	0	45	70	75	80	85	88	89	90
–60	0,08	0,15	0,64	1,11	2,44	9,2	44,0	105,8	378,8
–30	0,12	0,25	1,05	1,82	3,91	13,5	49,2	91,8	200,2
0	0,15	0,30	1,28	2,20	4,69	15,5	51,4	89,6	175,3
+30	0,17	0,35	1,44	2,47	5,24	16,9	52,9	88,7	164,0
+60	0,23	0,46	1,89	3,22	6,69	20,4	57,6	90,3	152,2

Таблица 2

Приземная температура, °С	Зенитный угол, град								
	0	45	70	75	80	85	88	89	90
–60	0,08	0,11	0,22	0,29	0,42	0,81	1,65	2,39	3,94
–30	0,12	0,18	0,36	0,48	0,70	1,30	2,48	3,41	5,08
0	0,15	0,22	0,45	0,59	0,85	1,56	2,90	3,90	5,62
+30	0,17	0,25	0,50	0,66	0,96	1,75	3,20	4,24	5,98
+60	0,23	0,32	0,67	0,88	1,32	2,24	3,93	5,07	6,88

На основе строгих формул для трехмерно-неоднородной атмосферы [7] в данной работе выполнены количественные оценки влияния горизонтальных градиентов показателя преломления на величину рефракции в вертикальной и горизонтальной плоскости, а также исследованы границы применимости некоторых приближенных формул. Расчеты углов рефракции выполнялись в диапазоне приземных температур от –60 до +60 °С и значений Γ_N от 10^{-8} до 10^{-5} км⁻¹, что примерно соответствует диапазону Γ_T от 0,01 до 10 град/100 км. Некоторые результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2. Величина поправки к астрономической рефракции в вертикальной плоскости Δr^B , обусловленная го-

ризонгальным градиентом $\Gamma_N = 10^{-7} \text{ км}^{-1}$, приведена в табл. 1, а в табл. 2 — для тех же условий значения астрономической рефракции в горизонтальной плоскости — называемой еще боковой рефракцией r^B (Δr^B , r^B в угл. секундах).

Как видим, влияние горизонтальных градиентов очень существенно, особенно при больших зенитных углах. Анализ формул [7] и количественные расчеты показывают, что величины Δr^B , r^B прямо пропорциональны приземному значению Γ_N , поэтому данные табл. 1 и 2 могут служить для предварительных оценок рефракционных поправок, если известно Γ_N .

Для зенитных углов $\zeta \leq 70^\circ$ с хорошей точностью углы рефракции Δr^B и r^B можно рассчитывать по различным приближенным формулам [4, 7], например, в виде [7]:

$$\Delta r^B = \Gamma'_N K \sec^2 \zeta; \quad (1)$$

$$r^B = \Gamma''_N K \sec \zeta, \quad (2)$$

где Γ'_N и Γ''_N — проекции горизонтального градиента на вертикальную и горизонтальную плоскость; K — параметр, характеризующий принятую модель вертикального распределения показателя преломления. При $\zeta > 70^\circ$ формулы (1) и (2) дают систематически завышенные значения углов рефракции на величину δr :

ζ , град	70	75	80	85	88	89
δr^B , угл. с	$\frac{0}{0,06}$	$\frac{0,01}{0,2}$	$\frac{0,05}{0,9}$	$\frac{0,7}{9,8}$	$\frac{18}{131}$	$\frac{140}{662}$
δr^B , —"	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{0,02}$	$\frac{0,01}{0,07}$	$\frac{0,05}{0,4}$	$\frac{0,5}{2,6}$	$\frac{1,9}{8,0}$

Числитель соответствует приземной температуре $t_0 = -60^\circ\text{C}$, знаменатель — $t_0 = +60^\circ\text{C}$, $\Gamma_N = 10^{-7} \text{ км}^{-1}$.

Для исключения систематической погрешности формулы (1), (2) были нами заменены аппроксимирующими функциями

$$\Delta r^B = \rho'' \Gamma'_N K \sec 2(\xi - \varphi), \quad (3)$$

$$r^B = \rho'' \Gamma''_N K \sec(\xi - \psi), \quad (4)$$

где $\rho'' = 206265$, а значения φ и ψ в зависимости от ζ и приземной температуры $T_0 = t_0 + 273,15$ равны

$$\varphi = \exp[-39,6711 + 0,08165 \cdot T_0 + (0,43154 - 0,0008547 T_0) \zeta]; \quad (5)$$

$$\psi = \exp[-49,8883 + 0,09745 \cdot T_0 + (0,55104 - 0,0010530 T_0) \zeta]. \quad (6)$$

Параметр K , соответствующий экспоненциальной зависимости показателя преломления от высоты, следует определять по результатам аэрологического зондирования в конкретном районе, либо в первом приближении по формуле для высоты однородной атмосферы [1]:

$$K = R_c T_0 / g, \quad (7)$$

где R_c — удельная газовая постоянная сухого воздуха; g — ускорение свободного падения.

Средняя квадратическая ошибка σ определения Δr^B и r^B по формулам (3) и (4), полученная путем их сравнения с точными значениями в диапазоне приземных температур от -30 до 60°C , приведена ниже (без учета погрешности определения Γ_N)

ζ , град	75	80	85	88	89	90
$\sigma_{\Delta r^B}$, угл. с	0,01	0,01	0,15	0,9	2,1	11,3
σ_{r^B} , —"	0	0	0,01	0,02	0,04	0,2

В заключение необходимо отметить, что существующая точность и пространственно-временное разрешение аэрологического зондирования не позволяют получить значения Γ_N точнее, чем с ошибкой 50–70%. Поэтому, как показывают оценки, для обеспечения максимальной точности строгих формул

[7] или приближенных (3), (4) необходимо использование дистанционных оперативных методов измерения температуры с ошибкой менее 0,1 град. Пространственно-временное разрешение при этом должно быть максимально возможным для измерения локальных градиентов температуры [6], особенно при расчете углов рефракции на горизонтальных трассах, проходящих над сложным рельефом и разной подстилающей поверхностью.

1. Юношев Л. С. Боковая рефракция при измерениях углов М.: Недра, 1969 — 96 с.
2. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии! Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 640 с.
3. Василенко Н. А. — В кн.: Астрометрия и астрофизика. Киев: Наукова думка, 1972, вып. 17, с. 96—108.
4. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция. Ч. III. — Изв. АОЭ, 1973, № 41—42.
5. Нелюбин Н. Ф. Учет влияния атмосферы при измерениях зенитных расстояний и наклонных дальностей: Автореф. дис. канд. техн. наук. Львов, 1984.
6. Мищенко И. А. — В кн.: Исследования в области метрологического обеспечения дальнометрии. Харьков: НПО «Метрология», 1981, с. 65—70.
7. Шабельников А. В. — В кн.: Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: Наука, 1986, с. 25—32.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступило в редакцию
16 февраля 1988 г.

N. F. Nelyubin. Effect of Horizontal Atmospheric Density Inhomogeneity on Refractive Corrections.

Refraction angles in horizontal and vertical planes were computed [or a 3-D inhomogeneous atmosphere in a wide range of ground temperatures and refractive index horizontal gradients. The calculations show that the neglect of the horizontal atmospheric inhomogeneity may lead to serious systematic errors in the estimated refractive corrections.