

УДК 551.593.1+528.061.2

В. Н. ГЕНИН, М. В. КАБАНОВ, Н. Ф. НЕЛЮБИН

О ВЛИЯНИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ УГЛОВ ЗЕМНОЙ РЕФРАКЦИИ

Использование оптического излучения в системах космической связи и локации потребовало совершенствования методов учета земной оптической рефракции, особенно для объектов,

наблюдаемых на больших зенитных расстояниях. Несмотря на то что исследования рефракции имеют многовековую историю [8, 3], существующая литература содержит ограниченную информацию по этому вопросу. Наиболее распространенным и доступным методом определения земной рефракции является расчетный, основанный либо на численном интегрировании точного уравнения рефракции, либо на использовании приближенных формул.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов углов рефракции для различных зенитных расстояний, а также обсуждаются ошибки, возникающие при расчете земной рефракции по строгим формулам с использованием экспериментальных данных о профилях метеозаэлементов.

Угол рефракции r рассчитывался по формуле [11]

$$\operatorname{tg} r = \frac{\sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2 \xi} \sin \theta + \gamma \sin \xi (1 - \cos \theta)}{\sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2 \xi} \cos \theta - \gamma \cos \xi + \gamma \sin \xi \sin \theta}, \quad (1)$$

где ξ — видимое зенитное расстояние наблюдаемого объекта, а угол θ определяется из следующего выражения:

$$\Theta = R_0 n_0 \sin \xi \int_{R_0}^{R_0+H} \left[\frac{1}{\sqrt{R^2 n^2 - R_0^2 n_0^2 \sin^2 \xi}} - \frac{1}{n_0 \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 \xi}} \right] \frac{dR}{R}, \quad (2)$$

где R_0 — радиус Земли в точке наблюдения; $R = R_0 + h$, h — переменная высота по траектории светового луча; H — высота наблюдаемого объекта; $n_0, n \equiv n(h)$ — показатель преломления воздуха в точке наблюдения и на высоте h ; $\gamma = R_0 / (R_0 + H)$.

В свою очередь, показатель преломления определяется через метеорологические параметры атмосферы по формуле Гладстона—Далля

$$n = 1 + c_\lambda T_0 / P_0 \cdot P / T, \quad (3)$$

где T и P — температура и давление воздуха на высоте h ; T_0 и P_0 — то же на поверхности Земли; c_λ — коэффициент, зависящий от длины световой волны λ . Для $T_0 = 288,15^\circ$, $P_0 = 1013,25$ мб и $\lambda = 0,69$ мкм; величина $c_\lambda = 0,00027589$ [10]. Значения углов рефракции, рассчитанные по формуле (1) для условий стандартной модели атмосферы (СМА СССР 64 [2]) и $\lambda = 0,69$ мкм, приведены в табл. 1.

Интегрирование в (2) проводилось по методу Гаусса с автоматическим выбором шага интегрирования и предварительной оптимизацией узлов интегрирования [7]. Стандартная модель атмосферы, полученная осреднением многолетних профилей метеозаэлементов над всей территорией Советского Союза, слабо

Таблица 1

Значения углов земной рефракции для условий стандартной модели атмосферы

Высота, км	Зенитные расстояния, град						
	45	70	80	85	88	89	90
5	12,3	33,1	67,8	132,8	286,0	428,0	713,2
10	21,7	58,5	119,1	228,3	455,0	633,0	946,9
50	47,9	128,3	256,2	466,0	829,5	1075,0	1472,1
∞	57,6	154,8	311,1	576,7	1059,4	1402,2	1971,2

отражает особенности распределения метеозлементов в пункте наблюдения. Значение рефракционной ошибки, обусловленной изменчивостью метеозлементов, в этом случае можно рассчитать по формулам [6]:

$$\sigma_r(P, T) = \frac{c_\lambda T_0 n_0 (1 - \gamma \cos \theta) R_0 \sin \xi}{(1 - 2\gamma \cos \theta + \gamma^2) P_0} \times$$

$$\times \int_{R_0}^{R_0+H} \frac{nR [\sigma_P^2 + (P/T)^2 \sigma_T^2]^{1/2}}{T (R^2 n^2 - R_0^2 n_0^2 \sin^2 \xi)^{3/2}} dR; \quad (4)$$

$$\Theta = R_0 n_0 \sin \xi \int_{R_0}^{R_0+H} \frac{dR}{R \sqrt{R^2 n^2 - R_0^2 n_0^2 \sin^2 \xi}}, \quad (4')$$

где $\sigma_r(P, T)$ — средние квадратические ошибки в рассчитанных углах рефракции из-за ошибок в давлении σ_P и температуре σ_T соответственно. О рефракционных ошибках, которые могут возникать в результате сезонной изменчивости вертикального профиля метеозлементов, можно судить по рис. 1. Здесь, а также на рис. 2—4 по оси абсцисс отложены зенитные расстояния ξ , по оси ординат — рефракционные ошибки, выраженные в угловых секундах.

На рис. 1 показаны результаты расчетов $\sigma_r(P, T)$ по формуле (4) с использованием дисперсий метеовеличин [6] для двух сезонов года. Из рисунка видно, что использование данных табл. 1 без учета сезонных изменений метеозлементов в пункте наблюдения приводит к значительным рефракционным ошибкам, особенно при больших зенитных расстояниях ($\xi > 80^\circ$). Для зенитного расстояния 90° средняя квадратичная погрешность в определении r достигает максимального значения и составляет примерно 150% летом и 300% — зимой. Рефракционные ошибки можно уменьшить, если ввести поправку на изменение состояния атмосферы в соответствии с формулой [3]

$$r' = r_{\text{СМА}} \frac{T_0 P_0'}{P_0 T_0'}, \quad (5)$$

где $r_{\text{СМА}}$ — угол рефракции, вычисленный с учетом распределения метеоэлементов стандартной модели атмосферы (табл. 1): P_0, T_0 — соответственно давление и температура стандартной модели атмосферы; P_0' и T_0' — давление и температура, измеренные в приземном слое в месте установки системы. Для оценки соответствующих ошибок проведено сравнение результатов расчетов углов рефракции по стандартной и местной моделям

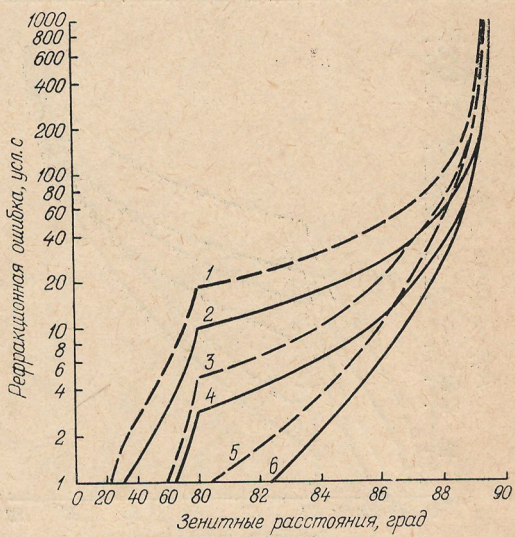


Рис. 1. Рефракционные ошибки стандартной модели атмосферы (СМА СССР 64) для двух сезонов:
 лето — (1, 2 — $H=5$ км; 3, 4 — $H=50$ км, 5, 6 — $H=\infty$; H — высота объекта наблюдения).

атмосферы (станция Балхаш, Казахская ССР). Результаты расчетов приведены в табл. 2. В первом столбце таблицы даны «истинные» значения углов рефракции, вычисленные по местной модели атмосферы, во втором — значения r' , рассчитанные по стандартной модели с использованием формулы (5). Как видно из табл. 2, формула (5) дает вполне удовлетворительные резуль-

Таблица 2
 Сравнение углов рефракции, вычисленных по местным моделям атмосферы, со значениями, вычисленными для условий СМА с использованием формулы (5)

Зенитное расстояние, град.	Высота, км											
	Лето						Зима					
	5		50		∞		5		50		∞	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
45	10,2	11,4	44,0	44,3	53,3	53,3	16,1	13,4	53,3	52,2	62,8	62,8
70	27,7	30,6	117,8	118,6	143,0	143,1	43,4	36,1	143,1	139,9	169,0	168,8
80	56,5	62,7	234,8	236,8	287,2	287,5	89,2	73,9	287,0	279,4	340,9	339,2
85	110,9	122,7	426,1	430,7	530,0	532,1	176,1	144,8	529,2	508,1	637,8	627,8
88	241,5	264,3	754,0	766,6	969,2	979,1	394,6	311,9	984,8	904,5	1219,0	1155,2
89	396,1	395,6	977,2	994,4	1280,1	1295,9	630,0	466,7	1351,2	1173,3	1695,4	1528,0
90	485,3	659,1	1142,8	1360,5	1511,5	1821,8	1394,1	777,7	2335,4	1605,2	2942,1	2149,4

таты только для астрономической рефракции ($H = \infty$) и на зенитных расстояниях $\xi < 80^\circ$.

Дальнейшее повышение точности расчетов r может быть достигнуто построением сезонных моделей атмосферы для каждого пункта наблюдений.

На рис. 2 представлены результаты расчетов рефракционных ошибок, обусловленных дисперсией метеозлементов местной модели для станции Балхаш. Максимальная ошибка (для зе-

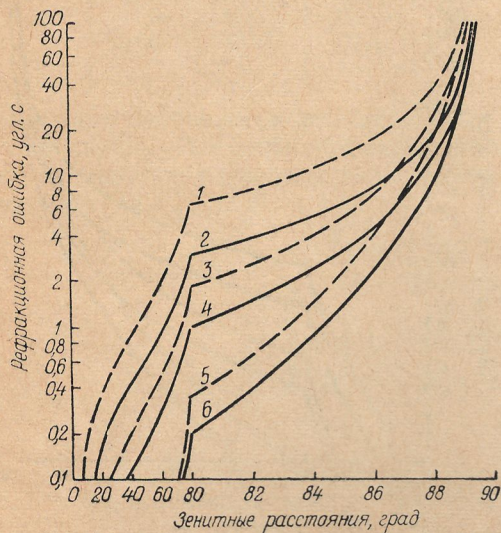


Рис. 2. Рефракционные ошибки местной модели атмосферы для двух сезонов года:

лето — — — ; зима — — — —
(1, 2 — $H=5$ км; 3, 4 — $H=50$ км; 5, 6 — $H=\infty$; H — высота объекта наблюдения).

нитного угла в 90°) в этом случае составляет примерно 80% летом и 150% — зимой. Анализируя рис. 1 и 2, видим, что местная модель атмосферы существенно повышает точность расчетов углов рефракции.

Рассмотрим рефракционные ошибки, связанные с временной и пространственной изменчивостями метеозлементов. Так, временную дисперсию метеозлементов $\sigma(t)$, в соответствии с работой [9], в двенадцатичасовом интервале оценивают по формуле

$$\sigma^2(t) = \sigma^2(6 \text{ ч}) \cdot t/6, \quad (6)$$

где $\sigma(6 \text{ ч})$ — средняя квадратическая изменчивость метеозлементов за 6 ч. Используя формулы (6) и (4), нетрудно рассчитать рефракционную ошибку, вызванную временной изменчивостью метеозлементов. Результаты таких расчетов показаны на рис. 3. Пространственная изменчивость метеозлементов [9]

$$\sigma^2(S) = \sigma^2(S_1) \cdot S, \quad (7)$$

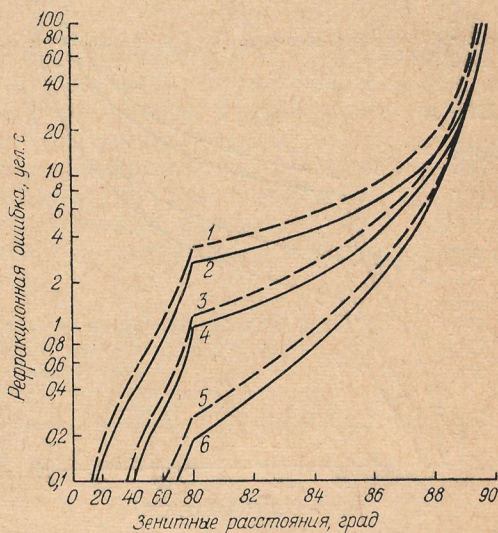
где $\sigma(S_1)$ — средняя квадратическая изменчивость метеозлементов на «единичном» расстоянии S_1 . Эта формула удовлетворительно описывает изменение метеозлементов до $S=700 \dots 1000$ км. Результаты расчетов рефракционных ошибок по фор-

муле (4) с учетом пространственной изменчивости метеоэлементов представлены на рис. 4. В качестве S_1 можно принять любое расстояние в интервале $0 \div S$, где справедлива формула (7).

Из приведенных выше данных следует, что дальнейшее увеличение точности расчета углов рефракции достигается при использовании профилей метеоэлементов, получаемых непосредственно перед наблюдением и в месте наблюдения. Точность расчетных значений угла рефракции в этом случае будет опре-

Рис. 3. Рефракционные ошибки временной изменчивости параметров атмосферы:

— интервал 6 ч;
 --- интервал 12 ч
 (1, 2 — $H=5$ км; 3, 4 — $H=50$ км; 5, 6 — $H=\infty$).



деляться только ошибками метода зондирования и точностью определения величин, входящих в формулы (1) — (3). Анализ источников погрешностей, расчет их значений приведены в работах [1, 5].

Таблица 3

Ошибки в расчетных значениях углов рефракции, обусловленные погрешностью метода зондирования

Высота, км	Зенитные расстояния, град.						
	45	70	80	85	88	89	90
5	0,08	0,23	0,48	0,91	2,43	4,88	177
10	0,08	0,24	0,51	0,88	2,56	5,06	179
50	0,03	0,10	0,23	0,59	2,06	4,55	183
∞	<0,01	0,01	0,04	0,26	1,56	4,11	193

Средние квадратические ошибки определения вертикального профиля температуры в зависимости от высоты по результатам аэрологического зондирования, по данным работы [6], составляют 0,5...2,0°, а средняя квадратическая ошибка определения давления — 0,6...1,0 мб. Рассчитанные по формуле (4) зна-

чения рефракционных ошибок, обусловленные ошибками метода разового радиозондирования, приведены в табл. 3. При этом предполагалось, что P_0' и T_0' в пункте наблюдения точно измерены. При точно измеренных параметрах, входящих в формулы (3)—(5), данные табл. 3 представляют минимально возможные погрешности в углах рефракции, так как не учитываются ошибки измерения P_0' и T_0' в пункте наблюдения, ошибки пространственной изменчивости метеозаэментов и турбулентного состояния атмосферы.

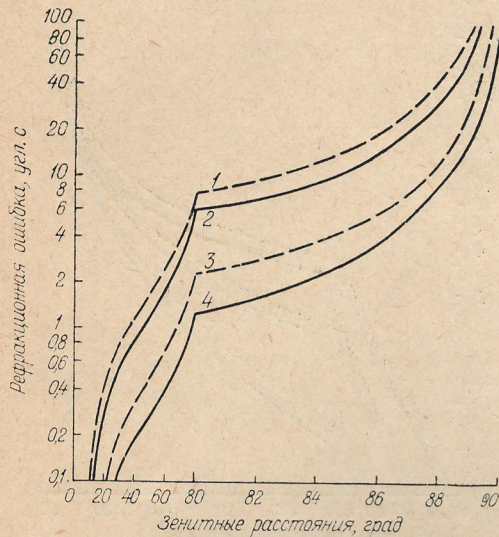


Рис. 4. Рефракционные ошибки пространственной изменчивости параметров атмосферы для двух сезонов года:

— лето; — зима (1, 2 — $S=1000$ км; 3, 4 — $S=100$ км).

Погрешность в условиях рефракции, обусловленную неточностью измерения температуры $\sigma(T_0)$ и давления $\sigma(P_0)$ в пункте наблюдения, рассчитывают по формулам:

$$\sigma_r(T_0) = \frac{c_\lambda F \cdot \sigma(T_0)}{T_0} \int_{R_0}^{R_0+H} n w dR; \quad (8) \quad \sigma_r(R_0) = \frac{c_\lambda \cdot F \cdot \sigma(P_0)}{P_0} \int_{R_0}^{R_0+H} n w dR, \quad (8')$$

где $F = \frac{(1 - \gamma \cos \theta) R_0 n_0 \sin \xi}{1 - 2\gamma \cos \theta + \gamma^2}$; $w = \frac{Rn}{(R^2 n^2 - R_0^2 n_0^2 \sin^2 \xi)^{3/2}}$.

Результаты расчетов по формулам (8) и (8') для условий стандартной атмосферы при $\lambda=0,69$ мкм, $\sigma(T_0)=0,1^\circ$ и $\sigma(P_0)=0,1$ мб приведены ниже:

ξ , град.	45	70	80	85	88	89	90
$\sigma_r(T_0)$	0,02	0,05	0,11	0,23	0,59	1,22	44,0
$\sigma_r(R_0) <$	0,01	0,01	0,03	0,06	0,17	0,35	12,5

Из анализа формул (8), (8') следует, что величина $\sigma_r(P_0)$ в (P_0/T_0) раз меньше $\sigma_r(T_0)$ (при $\sigma(T_0)=\sigma(P_0)$ и значения $\sigma_r(T_0)$ и $\sigma_r(P_0)$ практически не зависят от высоты наблюдаемого объекта).

Многочисленные исследования, приведенные, например, в работе [4], установили, что на точность измерения координат наблюдаемых объектов существенно влияет дрожание их изображения в фокальной плоскости оптической системы. Среднее значение дрожания в зените $\sigma_0(\xi) \approx 0,3''$. Используя зависимость дрожания от зенитного расстояния в виде $\sigma(\xi) = \sigma_0 \sec \xi$, получаем значение дрожания на разных зенитных расстояниях:

ξ , град	45	70	80	85	88	89	90
$\sigma(\xi)$	0,34	0,51	0,70	1,02	1,60	2,27	6,0

Данные для $\xi = 90^\circ$ взяты из наблюдений [4]. Суммарная погрешность в углах рефракции по результатам разового зондирования будет складываться из ошибок метода зондирования, пространственной изменчивости метеоэлементов по траектории луча, дрожания изображения, измерения T_0 , P_0 и т. д. Суммарная ошибка в углах рефракции, обусловленная этими погрешностями (при условии независимости каждой из них), приведена в табл. 4. Очевидно, при существующем в настоящее время

Таблица 4

Суммарная погрешность в расчетных значениях углов рефракции по результатам разового зондирования

Высота, км	Зенитное расстояние, град						
	45	70	80	85	88	89	90
Лето							
5	0,35	0,56	0,87	1,51	3,85	9,3	186
10	0,35	0,57	0,90	1,70	4,78	10,8	188
25	0,34	0,55	0,85	1,68	5,00	11,3	190
50	0,34	0,53	0,78	1,43	4,64	10,9	192
100	0,34	0,52	0,73	1,27	4,12	10,5	195
∞	0,34	0,52	0,71	1,12	3,54	9,9	202
Зима							
5	0,35	0,57	0,96	2,02	5,72	12,2	187
10	0,35	0,60	1,10	2,56	7,55	16,0	190
25	0,34	0,56	0,98	2,38	7,74	16,8	193
50	0,34	0,53	0,82	1,90	6,94	16,2	195
100	0,34	0,52	0,75	1,55	6,35	15,4	197
∞	0,34	0,52	0,71	1,23	5,38	14,4	205

способе измерения вертикальных профилей температуры и давления данные табл. 4 представляют максимально возможную точность расчетных значений углов рефракции. При этом мы не учитываем такие реально существующие источники погрешностей, как наклоны слоев равной плотности, инверсии и изотермии, струйные течения и т. п.

Список литературы: 1. Генин В. Н., Нелюбин Н. Ф. Влияние параметров атмосферы на точность расчета углов рефракции для наклонных трасс. — В кн.: Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере, Томск, 1976.

2. *Глаголев Ю. А.* Справочник по физическим параметрам атмосферы. — М.: Гидрометеиздат, 1970. 3. *Колчинский И. Г.* Рефракция света в земной атмосфере. — Киев: Наукова думка, 1967. 4. *Колчинский И. Г.* Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. — Киев: Наукова думка, 1967. 5. *Куштин И. Ф.* Рефракция световых лучей в атмосфере. — М.: Недра, 1971. 6. *Нелюбин Н. Ф.* О влиянии пространственно-временной изменчивости атмосферы на величину рефракции. — В кн.: Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1976. 7. *Нелюбин Н. Ф., Нелюбина В. П.* К вопросу о вычислении рефракции на больших зенитных расстояниях. — В кн.: Тез. докл. IV Всесоюзного совещания по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1977. 8. *Нефедьева А. И.* Астрономическая рефракция. — Изв. Астроном. обсерватории им. Энгельгардта, 1968, № 36. 9. *Решетов В. Д.* Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. 10. Справочник по геофизике. — М.: Наука, 1965. 11. *Татарский В. И., Харитонова Т. Н.* Применение ортогональных разложений в теории атмосферной рефракции. — Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана, 1974, т. 10, № 9.

Работа поступила в редколлегию 7 февраля 1979 года. Рекомендована Сибирским отделением АН СССР, Институтом оптики атмосферы.
