

*Н. Ф. НЕЛЮБИН*

**ПРИРОДА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
В ТЕОРИИ РЕФРАКЦИИ.  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

Многочисленные измерения астрономической рефракции в разных районах Земли показывают наличие систематических отклонений вычисленных значений рефракции от измеренных [3, 4, 6, 8—11, 15—17, 20 и др.]. Например, по данным Н. А. Василенко [3, 4], аномалии рефракции (измеренные значения рефракции минус вычисленные по таблицам Пулковской обсерватории) имеют в среднем отрицательный знак в теплое время года и положительный — в холодный период. Средние значе-

ния аномалий в диапазоне зенитных расстояний  $\xi = 80 \dots 89,5^\circ$  составляют (по измерениям в Казахстане)  $-1,5 \dots -33''$  в летний период и  $0,3 \dots 103''$  — в зимний [4].

Измерения астрономической рефракции, выполненные в ГАО АН УССР А. С. Хариным на стационарном инструменте (вертикальный круг Ваншаффа), показали [17], что аномалии рефракции разных знаков могут иметь место не только в одном сезоне, но и в один и тот же вечер. При этом максимальные аномалии оказались в два-три раза меньше, чем по наблюдениям Н. А. Василенко (для того же пункта).

По измерениям разных авторов обнаружена зависимость углов рефракции от азимута. Так, по данным [3, 9, 10, 20], значения астрономической рефракции в восточной части неба больше, чем в западной на одном и том же зенитном расстоянии. По мнению исследователей, эти различия обусловлены влиянием преобладающих в это время наклонов слоев воздуха равной плотности. В то же время согласно [10] асимметрия наблюдаемых аномалий выражена во взаимно перпендикулярных направлениях сильнее, чем в диаметриально противоположных, а по абсолютной величине аномалии на порядок больше аномалий, полученных Н. А. Василенко в том же диапазоне  $\xi$  и примерно при тех же температурах (соответственно  $20''$  и  $1,1''$  при  $\xi = 86,5^\circ$ ). Такая зависимость аномалий рефракции от азимута наблюдаемого направления может иметь разную природу, в частности из-за неодновременности или недостаточного числа наблюдений в других азимутах. Попытки объяснить значения аномалий наличием горизонтальных градиентов и инверсий температуры в свободной атмосфере противоречивы даже при использовании данных аэрологического зондирования в районе наблюдений [1—3, 5, 7—9, 14, 21, 23, 24].

Аналогичные исследования предприняты в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО АН СССР. Для проверки точности некоторых расчетных методов [12, 13] сравнивались вычисленные значения астрономической рефракции с полученными из измерений на больших зенитных расстояниях в разных районах страны.

Измерения астрономической рефракции проводили в горах Сев. Кавказа (п. «ГАС ГАО»), в прибрежной зоне Черного моря (п. «Морское») и в Казахстане близ о. Балхаш. В наблюдениях участвовали сотрудники Львовского политехнического, Ростовского инженерно-строительного институтов и Института оптики атмосферы.

В 1979 г. в п. «Морское» сотрудники ЛПИ производили наблюдения на двух пунктах АП-1 и АП-2, находящихся на расстоянии  $\sim 300$  м друг от друга и таком же расстоянии от берега моря, инструментами УВ 2/2 [11, 16]. В 1980 и 1981 гг. наблюдения велись только на пункте АП-1. Углы астрономической рефракции  $r_z$  определяли из сравнения измеренных зенитных расстояний звезд с вычисленными на тот же момент времени.

В наблюдениях 1981 г. в п. «ГАС ГАО» (высота  $\sim 2,06$  км) участвовали сотрудники ЛПИ и РИСИ. Сотрудники РИСИ определяли углы рефракции азимутальным способом (без регистрации моментов измерения зенитных расстояний) с помощью теодолита ОТ-02М [15]. Сотрудники ЛПИ измерения проводили по той же методике, что в п. «Морское».

В п. «Балхаш» измерения выполняли все группы наблюдателей как по согласованным, так и независимым программам. Измерения в этом пункте представляют наибольший интерес с научной и методической точки зрения и являются предметом отдельного анализа. Во всех пунктах измерения проводили в теплый период года (лето, начало осени).

Для каждого измеренного зенитного расстояния вычисляли теоретические значения астрономической рефракции  $r_T$  и находили соответствующие аномалии  $\Delta r = r_a - r_T$ . Во всех пунктах наблюдений значения  $r_T$  определяли с использованием стандартной модели ГОСТ 4401-73, статистических региональных моделей (РМА), по Пулковским таблицам IV и V изданий (кроме п. «ГАС ГАО») и данных аэрологического зондирования на ст. Мин. Воды и Одесса во время проведения измерений. Соответствующие аномалии рефракции обозначены  $\Delta r_{\text{СМА}}$ ,  $\Delta r_{\text{РМА}}$ ,  $\Delta r_{\text{п}}^{\text{IV}}$ ,  $\Delta r_{\text{п}}^{\text{V}}$ ,  $\Delta r_z$ . При расчетах для п. «ГАС ГАО» данные аэрологического зондирования и средние многолетние профили в моделях атмосферы для ст. Мин. Воды, а также и профили метеоэлементов в стандартной атмосфере использовали, начиная с высоты 2 км.

Показатель преломления рассчитывали по формулам Овенса [22], приведенным нами к более простому виду [12]:

$$(n - 1) 10^6 \equiv N = 0,28439 \frac{P}{T} N_C K_P - \frac{12,134 e}{T}; \quad (1)$$

$$K_P = 1 + P \left( \frac{107101}{T} - 315,57 \right) 10^{-8}; \quad (2)$$

$$N_C = 83,3828 + \frac{24049,2}{130 + \lambda^{-2}} + \frac{159,9}{38,9 - \lambda^{-2}}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3)  $P$  и  $T$  — давление, измеренное барометром (в гПа), и температура (К),  $e$  — упругость водяного пара (в гПа),  $\lambda$  — длина волны (мкм).

Во всех вычислениях  $r_T$  использована эффективная длина волны  $\lambda_{\text{ef}}$ , при определении которой за спектральную чувствительность приемника излучения принимали среднюю между дневной и ночной кривую относительной спектральной чувствительности глаза. Распределение энергии в спектре наблюдаемых звезд частично брали из работы [18] или рассчитывали по формуле Планка и эффективной температуре, соответствующей спектральному классу данной звезды. Для уменьшения систематических ошибок, связанных с отличием реальной фи-

гуры Земли от сферы, в расчетах  $r_T$  использовали радиус кривизны нормального сечения земного эллипсоида. Коррекцию вычисленных значений рефракции из-за отличия фактических метеорологических условий в момент измерения зенитных расстояний от средних  $\bar{r}_T$  в используемой модели (или полученных в результате зондирования) выполняли по формуле [12]

$$r_T = \bar{r}_T \frac{\bar{T}_0 P_0}{P_0 T_0} \left[ 1 + \frac{\bar{P}_0 (\bar{T}_0 - T_0)}{\bar{T}_0^3} \operatorname{tg} \xi \right] \left[ \frac{1 - 0,132 e_0 / P_0}{1 - 0,132 \bar{e}_0 / P_0} \right], \quad (4)$$

Таблица 1

Пример аномалий астрономической рефракции в п. «ГАС ГАО».  
27/28. 07. 1981 г. Время:  $0^h 15^m - 1^h 15^m$ ; Звезда  $\alpha Sco$ ;  $A = 45^\circ$ ;  
 $P_0 = 794,6$  гПа;  $e = 10,5$  гПа

$\xi \dots^\circ$	$t_0$	$r_\alpha$	$\lambda_{ef}$	$\Delta r_{n'}$	$\Delta r_{ГМА}$	$\Delta r_{РМА}$	$\Delta r_\alpha$
81,3900	12,3	286,7	0,558	+ 2,2	+2,1	+1,8	+1,9
81,7566	12,3	297,5	0,558	+ 1,4	+1,2	+0,9	+1,0
82,9845	12,3	340,2	0,560	- 2,4	-2,7	-3,0	-3,0
83,3444	12,3	359,2	0,560	+ 0,4	0	-0,3	-0,4
83,7423	12,3	380,8	0,561	+ 2,2	+1,8	+1,5	+1,5
84,0283	12,3	397,1	0,561	+ 3,1	+2,7	+2,4	+2,6
84,8191	12,4	440,1	0,562	- 3,3	-5,1	-6,0	-5,9
86,0569	12,4	546,5	0,565	- 0,5	-2,9	-3,1	-2,9
86,8314	12,4	635,4	0,568	- 1,3	-6,0	-6,3	-6,2
87,6415	12,4	755,0	0,571	- 7,4	-13,2	-13,0	-11,2
88,1357	12,4	866,0	0,574	+ 6,4	-2,4	-2,3	-1,3
88,4711	12,4	848,7	0,576	+14,9	+3,1	+5,1	+6,0
88,8441	12,4	1059,5	0,579	+28,7	+7,1	+6,9	+6,0

где  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{P}_0$  и  $\bar{e}_0$  — средние приземные значения температуры, К; давления и упругости водяного пара в используемой модели, мбар;  $T_0$ ,  $P_0$  и  $e_0$  — их значения в точке наблюдения в момент измерения зенитных расстояний. Пример вычисления аномалий астрономической рефракции для п. «ГАС ГАО» приведен в табл. 1, где  $t_0$  — температура воздуха ( $^\circ\text{C}$ ) у инструмента в момент измерения  $\xi$ ;  $\lambda_{ef}$  — эффективная длина волны (мкм);  $A$  — астрономический азимут наблюдаемой звезды на средний момент наблюдения.

При вычислении аномалий использовано свыше 1000 измеренных значений астрономической рефракции в диапазоне зенитных расстояний  $65 \dots 89^\circ$ . Для удобства все аномалии приведены к целым градусам. Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Вычисленные значения астрономической рефракции  $r_T$  для рассмотренных методов в пределах теоретических оценок точности совпадают друг с другом и со значениями  $r_T$ , вычисленными по результатам аэрологического зондирования [12] (являющимися «эталонными» при оценке точности расчетных методов).

## Средние аномалии астрономической рефракции в п. «Морское»

Год, пункт	Зенитное расстояние, ...°														
	65...75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	
1979, АП-2	+0,2 37	-0,8 15	-0,1 15	-0,1 15	0,2 14	1,2 12	0,7 12	0,1 10	0,8 10	1,4 10	-1,1 6	-6,4 3	-3,5 3	-	
1979, АП-1	-4,5 130	-3,5 30	-3,9 32	-3,9 37	-3,8 37	-3,9 36	-3,6 35	-3,9 30	-4,3 28	-4,2 20	-4,5 20	-6,4 12	-8,7 7	-11,4 2	
1980, АП-1	-	-	-2,4 3	-4,2 6	-7,6 6	-10,3 9	-9,1 12	-9,6 12	-9,7 12	-11,3 12	-13,2 10	-17,4 8	-22,1 3	-32,2 2	
1981, АП-1	-	-4,7 2	-5,0 2	-3,6 2	-3,3 4	-4,4 6	-3,7 6	-5,0 8	-4,9 12	-5,1 6	-13,4 10	-10,6 7	-10,8 5	-16,1 5	

2. Наилучшее совпадение с «эталонным» методом имеют значения  $\gamma_T$ , вычисленные при использовании статистических региональных моделей атмосферы.

3. Значения рефракции  $\gamma_T$ , вычисленные по Пулковским таблицам, систематически меньше рассчитанных другими методами. Например, разность  $\Delta$  между значениями рефракции, вычисленными по данным аэрологического зондирования и Пулковским таблицам V издания, в рассматриваемый период наблюдений следующая:

$\Delta''$ , ...	75	80	82	
	0,3	0,6	0,8	
84	85	86	87	88
1,0	1,4	2,7	5,1	7,2
	88,5	89		
	14,2	31,6		

Столь большие значения разностей  $\Delta$  не позволяют корректно применять Пулковские таблицы для анализа полученных аномалий, поэтому в дальнейшем для их исследования используем данные аэрологического зондирования.

4. В большинстве случаев аномалии рефракции имеют систематический характер. В табл. 2 и 3 приведены средние значения аномалий, вычисленные с использованием данных аэрологического зондирования в рассматриваемый период (в числителе значения аномалий, в знаменателе их число). Для пункта «ГАС

ГАО» при расчете аномалий использовались преимущественно звезды, общие для обеих групп наблюдателей (ЛПИ и РИСИ), поэтому число аномалий, применяемых при расчете средних значений  $\Delta r$ , меньше их общего числа.

5. Из табл. 2 и 3 видно, что аномалии рефракции, определенные для п. АП-1 «Морское», имеют отрицательный знак в весь рассматриваемый период наблюдения (1979—1981 гг.). В то же время аномалии рефракции для п. АП-2 носят случай-

Таблица 3

Средние аномалии астрономической рефракции в п. «ГАС ГАО»

Наблю- датель	Зенитное расстояние, ...°									
	81	82	83	84	85	86	87	88	88,5	89
РИСИ	—	+4,0	+5,0	—3,1	—6,2	+7,2	+3,8	+7,4	+9,5	—
		3	4	4	8	9	9	9	8	
ЛПИ	—2,5	—2,0	—4,4	—4,2	—6,2	—6,0	—8,7	—4,0	+4,2	—9,0
	4	5	5	9	10	12	13	9	6	2

ный характер и существенно меньше, чем на п. АП-1. Отрицательный знак (до  $\xi=88^\circ$ ) имеют аномалии рефракции в п. «ГАС ГАО» по измерениям наблюдателей ЛПИ, в то время как аномалии по данным РИСИ в основном положительны.

6. Исследована зависимость полученных аномалий от азимута наблюдаемых звезд. Так, на п. АП-2 аномалии рефракции в северной части неба больше, чем в южной на величину  $\Delta_N$ :

$\xi, \dots^\circ$	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
$\Delta_N, \dots''$	1,1	2,3	2,4	0,6	2,7	2,6	0,3	2,7	4,1	3,7	2,2	—	5;9

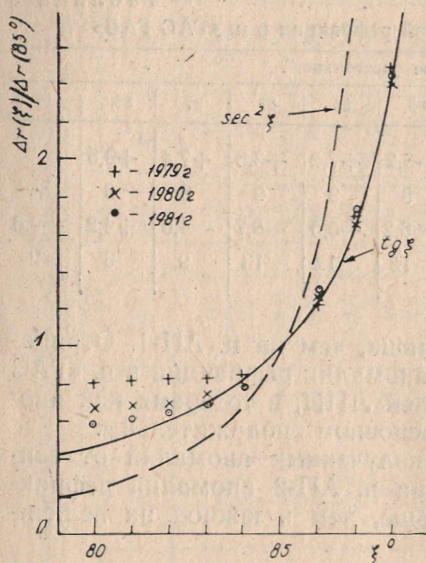
Однако на п. АП-1 в том же году аномалии рефракции больше в западном направлении на величину  $\Delta_W$ :

$\xi, \dots^\circ$	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
$\Delta_W, \dots''$	3,2	4,2	3,5	2,7	1,7	1,5	—0,4	3,3	3,0	2,7	2,5	2;2

Для п. «ГАС ГАО» зависимость аномалий рефракции от азимута не обнаружена. Из-за неодновременности наблюдений этот вывод носит предварительный характер.

В заключение необходимо отметить следующее. Проведенный анализ не позволяет однозначно судить о природе аномалий. Их основным источником, не учитываемым в расчетных методах, являются горизонтальные градиенты показателя преломления в атмосфере. Как следует из теории, аномалии рефракции в этом случае пропорциональны  $\sec^2 \xi$  (при  $\xi < 89^\circ$ ) [19]. Наблюдаемый характер изменения аномалий от зенитного расстояния не соответствует такой зависимости для всех пунктов наблюдений. Наиболее наглядно зависимость аномалий  $\Delta r$  от зенитного расстояния иллюстрируется рисунком, на котором представлены сглаженные нормированные значения  $\Delta r(\xi)/\Delta r$

(85°) для п. АП-1. Как видно из рисунка, до  $\xi \leq 83^\circ$  значения аномалий практически постоянны, а дальше их величина составляет  $\sim \operatorname{tg} \xi$ , что может свидетельствовать о влиянии систематических ошибок при измерении  $T_0$  и  $P_0$ , значение которых также пропорционально  $\operatorname{tg} \xi$  при  $\xi < 89^\circ$ . Но для объяснения абсолютной величины аномалий следует предположить, что ошибка измерения  $T_0$  составила в 1979 г.  $\sim 2^\circ$ , в 1980 г.  $\sim 6^\circ$  и в 1981 г.  $\sim 3^\circ$ , что нереально и к тому же не объясняет характер и значение аномалий при  $\xi \leq 83^\circ$ . Для п. «ГАС ГАО» зависимость аномалий от зенитного расстояния носит еще более сложный характер.



Зависимость нормированных значений аномалий рефракции от зенитного расстояния для п. АП-1:  
 | — функция  $\operatorname{tg} \xi$ , — — — —  $\sec^2 \xi$

Еще один источник аномалий — неучтенные либо неизвестные систематические ошибки метода измерения рефракции. Например, в п. «ГАС ГАО» в течение двух ночей выполнены синхронные измерения астрономической рефракции по одной и той же звезде двумя инструментами. При этом оказалось, что значения  $r_\xi$ , полученные наблюдателями ЛПИ, систематически больше значений  $r_\xi$ , измеренных наблюдателями РИСИ. Разность составляет  $6''$  в одной серии и  $20''$  в другой и в обоих случаях не зависит от зенитного расстояния. Удовлетворительного объяснения этот факт не имеет.

1. Беляев Н. А. Синоптические рефракционные аномалии в области антициклона на средней части Европейской территории СССР // *Астроном. журн.* 1954. Т. 31. № 3. С. 267—280. 2. Беляев Н. А. К вопросу определения астрономической рефракции // *Астроном. журн.* 1955. Т. 32. № 6. С. 555—562. 3. Василенко Н. А. Наблюдения астрономической рефракции в Голодеево на больших зенитных расстояниях // *Астрометрия и астрофизика.* 1969. Вып. 5. С. 47—62. 4. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные времена года // *Астрометрия и астрофизика.* 1972. Вып. 17. С. 96—108. 5. Василенко Н. А., Харитонова Т. Н. О точности вычисления астрономической рефракции методом статистических ортогональных разложений показателя преломления // *Астрометрия и астрофизика.* 1977. Вып. 31. С. 38—41. 6. Заблоцкий Ф. Д., Киричук В. В. Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в Заполярье // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка.* 1976. Вып. 23. С. 28—35. 7. Заблоцкий Ф. Д., Кулиш Л. А. Влияние инверсии температуры на величину астрономической рефракции в центральной Антарктиде // *Всесоюз. совещ. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере: Тез. докл. Томск.* 1983. С. 76—78. 8. Зверев М. С. К вопросу о вычислении рефракционных аномалий по данным аэрологических наблюдений // *Астроном. журн.* 1946. Т. 23.

№ 2. С. 97—110. 9. *Канторов А. Ф., Коржинская С. В., Тютюрев Г. С.* О зависимости значений астрономической рефракции от азимута светила // Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1982. С. 9—17. 10. *Киричук В. В., Олейник Н. Н.* Опыт определения асимметрии астрономической рефракции вблизи горизонта // Геодезия, картография и аэрофотоъемка. 1977. Вып. 26. С. 32—39. 11. *Маслич Д. И., Коваленко В. А., Русин М. И.* и др. Экспериментальное определение астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях // II совещ. по атмосферной оптике: Тез. докл. Томск, 1980. С. 182—185. 12. *Нелюбин Н. Ф.* Учет влияния атмосферы при измерениях зенитных расстояний и наклонных дальностей: Автореф. дис. . . канд. техн. наук. Львов, 1984. 13. *Нелюбин Н. Ф.* Использование аналитических моделей атмосферы для учета рефракции оптического излучения // Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1982. С. 74—88. 14. *Нефедьева А. И.* Астрономическая рефракция // Изв. АОЭ. 1976. № 41—42. С. 3—70. 15. *Редичкин Н. Н.* Опыт определения астрономической рефракции по материалам наблюдений опорных звезд // Геодезия и фотограмметрия. Ростов н/Д, 1981. С. 37—45. 16. *Филиппов А. Е., Маслич Д. И., Русин М. И.* и др. О точности определения угла астрономической рефракции визуальным методом с помощью полевых универсальных инструментов // II Совещ. по атмосферной оптике: Тез. докл. Томск, 1980. С. 151—154. 17. *Харин А. С.* Об аномалиях рефракции по данным меридианных наблюдений // Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1982. С. 174—184. 18. *Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н.* Сводный спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата. 1978. 19. *Шабельников А. В.* Рефракция электромагнитных волн в трехмерно-неоднородной атмосфере // Всесоюз. совещ. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере: Тез. докл. Томск, 1983. С. 153—156. 20. *Brünig M.* Messungen und Gedanken zur Frage der Refraktions werte bei grossen Zenitdistanzen // Die Sterne. 1955. Bd. 31. № 9—10. S. 172—176. 21. *Galopp M. A., Telford L. E.* Use of atmospheric emission to estimate refractive errors in a non-horizontally stratified atmosphere // Radio. Sci. 1975. V. 10. № 11. P. 935—945. 22. *Owens I. C.* Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition // Appl. Opt. 1967. V. 6. № 1. P. 51—59. 23. *Teleki G.* A contribution into the research of astronomical refraction and its anomalies on the basis of aerological measurements carried out in Beograd // Publ. de l'Observ. astron. de Beograd. 1967. № 13. P. 5—44. 24. *Vickers W. W., Lopez M. E.* Low — angle radar tracking errors induced by nonstratified atmospheric anomalies // Radio Sci. 1975. V. 10. № 5. P. 491—505.