

## АСТРОНОМИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ СВЕТИЛ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ В ОТКРЫТОМ МОРЕ

Экспериментальные исследования астрономической рефракции, т. е. определения реальных углов рефракции из наблюдений небесных объектов, имеют важное значение для решения как прикладных (коррекция существующих таблиц рефракции), так и фундаментальных (уточнение моделей атмосферы на основе более глубокого проникновения в сущность протекающих в ней физических процессов) задач.

К настоящему времени получено большое количество реальных значений астрономической рефракции в разнообразнейших физико-географических условиях суши в диапазоне зенитных расстояний от 0 до 90°. К сожалению, нельзя того же сказать о районах открытого моря, где, за исключением зарубежных исследований 25—35-летней давности [10, 12—14], подобные работы не принимались.

Как известно, особенностью любых астрономических наблюдений на море является отсутствие неподвижного основания, что до сих пор ограничивает точность определения места корабля и единственный инструмент для этой цели — секстан (один из древнейших астрономических приборов) [1].

Несмотря на относительно невысокую точность ( $\pm 0,3 \dots \pm 0,6'$ ) секстан является универсальным инструментом для исследований астрономической рефракции, так как он позволяет получать как полные, так и дифференциальные углы астрономической рефракции [5], т. е. значения, определяемые соотношениями

$$\rho = h_{\text{изм}} - h_{\text{ист}}, \quad (1)$$

$$\delta\rho = \Delta h_{\text{ист}} - \Delta h_{\text{изм}}. \quad (2)$$

В первом случае (1) для нахождения  $h_{\text{ист}}$  необходимо с адекватной точностью знать место корабля; во втором случае определение места корабля становится излишним [5]. Именно это обстоятельство мы положили в основу экспериментальных исследований астрономической рефракции, выполненных на акватории Средиземного моря, ограниченной по широте параллелями 31N—41° N, а по долготе меридианами 8E—34° E, в период с 27.08 по 15.09. 1985 г.

Все наблюдения выполнены с палубы корабля в открытом море, когда отсутствовала прямая видимость береговых линий, в диапазоне высот  $0 \leq h \leq 10^\circ$ , т. е. в близгоризонтной зоне. В качестве объекта наблюдений использовалось Солнце, размеры видимого диска  $D$  и высоту  $h_{\text{изм}}$  нижнего (верхнего) края которого измеряли одновременно с помощью двух типовых секстанов, предварительно отъюстированных в соответствии с требованиями [1, 9].

Программой наблюдений предусматривались также измерения температуры и давления воздуха примерно на высоте точки наблюдений с достаточной частотой опроса. Кроме того, в программу ежевечерних (утренних) наблюдений Солнца включались измерения видимого наклона горизонта \*  $d$  [9], а в промежутке между утренними и вечерними наблюдениями Солнца ежедневно определялась поправка индекса секстана [9].

Покажем образец журнала наблюдений.

Дата: 30.08.85 г.

Восход,  $e=13,7$  м;  $d=-7,3'$   
 $\varphi_1=34^\circ 22'$ ;  $\varphi_2=34^\circ 20'$ ;  
 $\lambda_1=26^\circ 22'$ ;  $\lambda_2=26^\circ 22'$ ;  
 $A'_\odot=79^\circ$ ;  $A''_\odot=83^\circ$

Заход,  $e=13,7$  м;  $d=-8,0'$   
 $\varphi_1=32^\circ 21,4'$ ;  $\varphi_2=32^\circ 19,0'$   
 $\lambda_1=25^\circ 46,1'$ ;  $\lambda_2=25^\circ 44,3'$   
 $A'_\odot=280^\circ$ ;  $A''_\odot=284^\circ$

№ п/п	Th	$h_{\text{изм}}$ ⊙	$D_{\text{изм}}$		$t, ^\circ\text{C}$	В, мм рт. ст.	№ п/п	Th	$h_{\text{изм}}$ ⊙	$D_{\text{изм}}$		$t, ^\circ\text{C}$	В, мм рт. ст.
			⊙	⊙						⊙	⊙		
15	8 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	2,55°	29,1'	28,0'	26,5°	759	10	20 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup>	2,01°	28,6'	27,9'	27,5°	761

\* При отсутствии удовлетворительной видимости горизонта его наклонение рассчитывалось по известной методике [9].

В соответствии с приведенной выше программой наблюдений всего выполнено 282 определения дифференциальной астрономической рефракции в зоне  $0 \leq h \leq 10^\circ$ , причем значение ее рассчитывали по формуле

$$\delta\rho = 2R_\odot - D_0, \quad (3)$$

Таблица 1

Дифференциальная астрономическая рефракция в зоне  $0 \leq h \leq 10^\circ$  при  $t=+15^\circ\text{C}$  и  $B=1013,25 \cdot 10^2$  Па

№ п/п	$h$	$\delta\rho$	№ п/п	$h$	$\delta\rho$
1	9°22'	+7''	15	1°09'	+4''
2	8 43	+13	16	1 07	+ 6
3	8 03	+12	17	1 03	8
4	7 24	+14	18	1 01	- 3
5	6 48	+15	19	0 57	-15
6	5 33	+15	20	0 49	-18
7	4 54	+20	21	0 43	-22
8	4 09	+21	22	0 35	-23
9	3 34	+23	23	0 30	-23
10	2 49	+16	24	0 24	-30
11	1 54	+ 2	25	0 18	-31
12	1 47	+ 3	26	0 14	-31
13	1 36	+ 3	27	0 09	-32
14	1 14	+ 3	28	0 04	-33

Таблица 2

Астрономическая рефракция и ее аномалии относительно «Таблиц рефракции» [7, 8, 11] в зоне  $0 \leq h \leq 10^\circ$  при  $t=15^\circ\text{C}$  и  $B=1013,25 \cdot 10^2$  Па

№ п/п	$h$	$\rho[8]$	$\rho[7]$	$\rho[11]$	$\rho_{\text{небл}}$	$\Delta\rho[8]$	$\Delta\rho[7]$	$\Delta\rho[11]$
1	9°	5,75	5,9'	5,92'	5,92'	+0,2'	0'	0'
2	8	6,42	6,5	6,60	6,90	0,5	+0,4'	+0,3'
3	7	7,23	7,4	7,45	7,25	1,0	0,8	0,8
4	6	8,28	8,4	8,53	9,75	1,5	1,3	1,2
5	5	9,63	9,8	9,92	11,70	2,1	1,9	1,8
6	4,30°	10,48	10,7	10,80	12,86	2,4	2,1	2,1
7	4,00	11,50	11,7	11,80	14,20	2,7	2,5	2,4
8	3,30	12,60	12,9	13,00	15,66	3,0	2,7	2,6
9	3,30	14,00	14,3	14,47	17,30	3,3	3,0	2,8
10	2,30	15,70	16,1	16,21	18,87	3,2	2,8	2,7
11	2,00	17,75	18,2	18,37	21,22	3,5	3,0	2,8
12	1,30	20,28	20,9	21,06	23,70	3,4	2,8	2,1
13	1,00	23,48	24,3	24,46	26,70	3,4	2,4	2,2
14	0,30	27,60	28,7	28,86	30,68	3,0	2,0	1,8
15	0,00	32,96	34,5	34,67	35,10	2,1	0,6	0,4

где  $D_0$  — измеренный диаметр видимого диска Солнца, исправленный за инструментальные погрешности секстана [9] и приведенный к нормальным условиям «Таблиц рефракции» ПАО [8].

В табл. 1 приведены средние значения дифференциальной астрономической рефракции на высотах, соответствующих установкам лимба секстана, наиболее часто использовавшимся в течение всего периода наблюдений. Взяв эти значения за основу, введя понятие скорости измерения рефракции как отношения дифференциальной рефракции к длине интервала высоты, для которого она определена, и используя известную методику

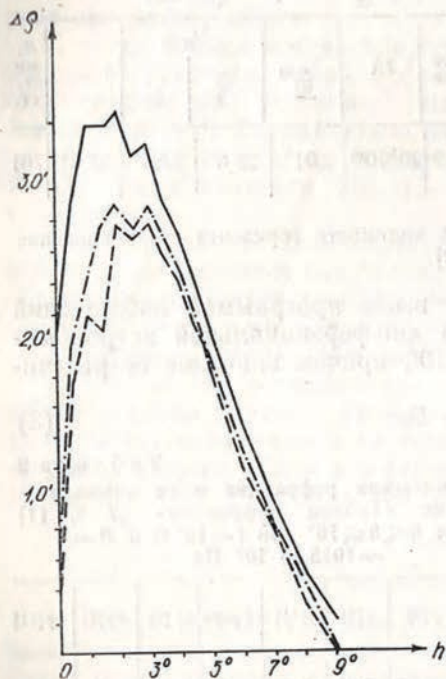


Рис. 1. Аномалии астрономической рефракции относительно «Таблиц рефракции» [7, 8, 11]:  
 —  $\Delta\rho$  [8]; - - -  $\Delta\rho$  [7]; - · -  $\Delta\rho$  [11].

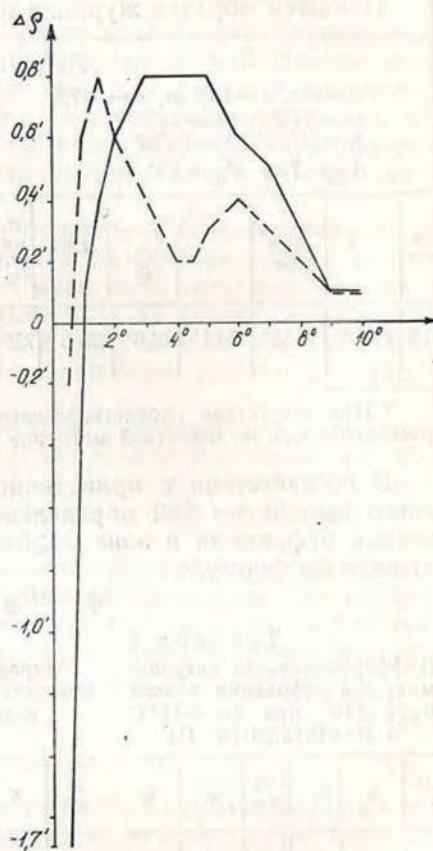


Рис. 2. Аномалии астрономической рефракции относительно «Таблиц рефракции» [11] в открытом море и на суше согласно [13, 14], приведенные к  $t = +15^\circ\text{C}$ ,  $B = 1013,25 \cdot 10^2$  Па.  
 —  $\Delta\rho$  в открытом море; - - -  $\Delta\rho$  на суше.

обратного интерполирования функций, в дальнейшем мы вычислили наблюдаемые значения астрономической рефракции и ее аномалии относительно «Таблиц рефракции» [7, 8, 11]. Характеры изменений аномалий астрономической рефракции относительно «Таблиц рефракции» [7, 8, 11] в открытом море представлены на рис. 1.

Сравним рис. 2 и 3, иллюстрирующие характер изменения аномалий астрономической рефракции относительно «Таблиц рефракции» [11] по данным Смайли [13, 14], а по нашим данным [2] относительно «Таблиц рефракции» [7] для суши и открытого моря.

Анализ данных, помещенных в табл. 1 и 2, на рис. 1 и 2, а также сопоставление их с результатами исследований аномалий астрономической рефракции в различных физико-географических районах суши [2—4] позволяют сделать следующие выводы.

1. Характер изменения аномалий астрономической рефракции как относительно «Таблиц рефракции» [7, 8], так и относительно «Таблиц рефракции» [11] при наблюдениях в открытом море на высотах  $0 \leq h \leq 10^\circ$  резко отличается от их поведения при аналогичных наблюдениях над сушей. Это обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что в основе как «Таблиц рефракции» [7, 8], так и «Таблиц рефракции» [11] лежат модели атмосферы, построенные на данных метеостанций, в подавляющем своем большинстве расположенных на суше. В пользу этого свидетельствует и лучшее согласование табличных и наблюдаемых значений астрономической рефракции для суши (см. рис. 2 и 3)

$|\Delta\rho_{\text{море}}|_{\text{max}} = 1,7'$ ,  
 $|\Delta\rho_{\text{суша}}|_{\text{max}} = 0,7'$ ;  $|\Delta\rho_{\text{море}}|_{\text{max}} = 3,0' *$ ,  $|\Delta\rho_{\text{суша}}|_{\text{max}} = 0,8'$ .

2. Наиболее значительные аномалии астрономической рефракции обнаружены на высотах  $0^\circ 30' \leq h \leq 3^\circ$ , причем они достигают максимума в диапазоне высот  $2 \leq h \leq 4^\circ$ . Интересно отметить, что по данным исследований над сушей [4] при наблюдениях на высоте  $h \approx 5^\circ$  обнаружен минимум абсолютных значений аномалий астрономической рефракции.

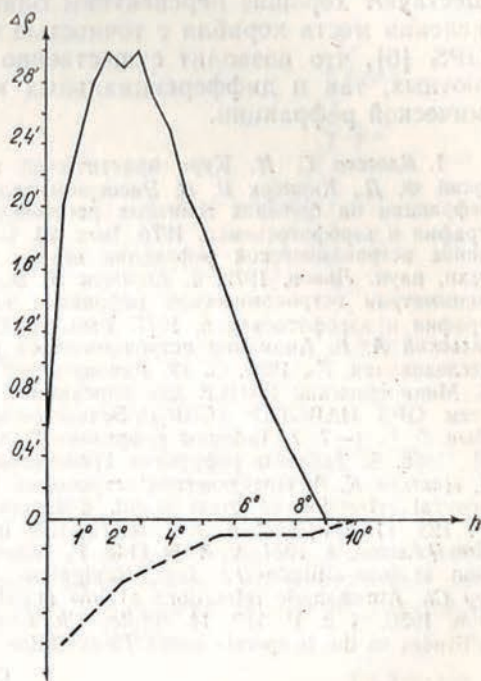


Рис. 3. Аномалии астрономической рефракции относительно «Таблиц рефракции» [7] в открытом море и на суше согласно [2], приведенные в  $t = +15^\circ\text{C}$ ,  $B = 1013,25 \cdot 10^2$  Па.

—  $\Delta\rho$  в открытом море; - - -  $\Delta\rho$  на суше.

\* Аномалия  $|\Delta\rho|_{\text{max}}$  в данном случае взята относительно «Таблиц рефракции» [7], чтобы сохранить корректность сравнения с аналогичными данными для суши, приведенными в [2].

3. Учитывая относительно невысокую точность определения реальных углов астрономической рефракции с помощью секстана, обсуждаемые в статье результаты следует рассматривать как предварительные, позволяющие скорее получить качественную оценку аномалий астрономической рефракции и характера их изменения с высотой, чем их точную количественную оценку. Для получения последней, по нашему мнению, в настоящее время существуют хорошие перспективы благодаря применению для определения места корабля с точностью порядка  $\pm 3 \dots 5''$  систем типа GPS [6], что позволит существенно повысить точность как абсолютных, так и дифференциальных методов определения астрономической рефракции.

1. Блажко С. Н. Курс практической астрономии. М., 1979. 2. Заблочкий 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. 3. Киричук В. В. Исследование астрономической рефракции вблизи горизонта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1972. 4. Киричук В. В., Олейник Н. Н. Опыт определения асимметрии астрономической рефракции вблизи горизонта // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1977. Вып. 26. С. 32—39. 5. Киричук В. В., Архангельский А. В. Аномалии астрономической рефракции — методы выявления и исследования. К., 1985. С. 12. Рукопись деп. в УкрНИИТИ, № 2759-Ук85Деп. 6. Мини-приемник EAGLE для определения местоположения по спутникам систем GPS НАВСТАР (США) // Экспресс-информация. Сер. Геодезия. 1986. Вып. 5. С. 1—7. 7. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. Изд. 4-е. М.: Л., 1956. 8. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. Изд. 5-е. Л., 1985. 9. Цветков К. А. Практическая астрономия. М., 1951. 10. Clemence G. M. Astronomical refraction of great zenith distances // Astron. J. 1951. V. 56. N 1193. P. 123. 11. Garfinkel B. An investigation in the theory of astronomical refraction // Astron. J. 1944. V. 4. N 1148. P. 169—179. 12. Sadler D., Scott W. Refraction at low altitudes // J. Inst. Navigation. 1960. N 13. P. 139—147. 13. Smiley Ch. Atmospheric refractions at low angular altitudes in the tropics // Navigation. 1950. N 2. P. 110. 14. Smiley Ch. Atmospheric refractions at low angular altitudes in the temperate zones // Navigation. 1951. N 3. P. 33.