

Б. Т. ТЛУСТЯК

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗЕМНОЙ РЕФРАКЦИИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БОЛЬШИХ ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Различные аспекты теории и практики учета земной рефракции над водными поверхностями (угломерные измерения при производстве топографических съемок в прибрежной зоне морей и океанов, свето- и радиоизмерения расстояний, расчет дальности визуального обнаружения объектов из-за горизонта) до настоящего времени окончательно не решены и требуют детальных исследований светопреломляющих свойств приподнятого слоя атмосферы и разработки действенных методов учета влияния метеорологических условий на результаты геодезических измерений.

Исследования С. В. Селиванова [7] в Копорском заливе, П. Ф. Шакурова на южном берегу Крыма и К. В. Казанского [4] в Финском заливе отличаются наибольшей полнотой и систематичностью, относятся к изучению наклона видимого горизонта с высоты соответственно 6,20 и 12,4 м над уровнем моря. Использование наклона видимого горизонта для вычисления коэффициента земной рефракции связано с ошибками определения высоты волнения и другими факторами, определяющими дальность его обнаружения, а в условиях открытого моря и ошибками, возникающими от качки корабля.

Для нужд геодезического производства многие исследователи [2], [5] применяли наблюдения неподвижных визирных целей, установленных на определенной высоте над водной поверхностью. Исследования М. К. Дрока [2] относятся к внутриматериковым водоемам, а Д. И. Маслича [5] — к внутриконтинентальным морям. Эти исследования позволили выявить характерные особенности влияния рефракции на точность геодезического нивелирования в связи с метеорологическими условиями этих районов и разработать рекомендации по их учету и минимизации ошибок рефракционного происхождения.

Определенный научный и практический интерес для геодезического производства представляют исследования закономерностей дневного изменения коэффициента земной рефракции (КЗР) для объектов, расположенных на различной высоте над водной поверхностью и на различных расстояниях от берега в условиях минимального влияния суши.

Для исследования особенностей дневного хода КЗР в зависимости от основных метеорологических элементов, высоты и длины визирного луча в августе 1967 г. автор провел специальные экспериментальные исследования в районе Каламитского залива, включающие измерения зенитных расстояний на визирные цели и измерения метеорологических элементов.

Участок работ расположен в равнинной местности Западного Крыма с довольно узким песчаным побережьем между Черным морем и озером Сасык (рис. 1). Климат в районе проведения эксперимента континентальный, с жарким сухим летом.

Период наблюдений (15—26 августа) характеризовался относительно устойчивой солнечной погодой и хорошей видимостью.

Колебания температуры воздуха для светового периода суток 16,4—21°,8 С, температуры воды 19—27° С, атмосферного давления 755,6—763,3 мм рт. ст. Ветер слабый, умеренный, преимущественно северных и северо-восточных направлений.

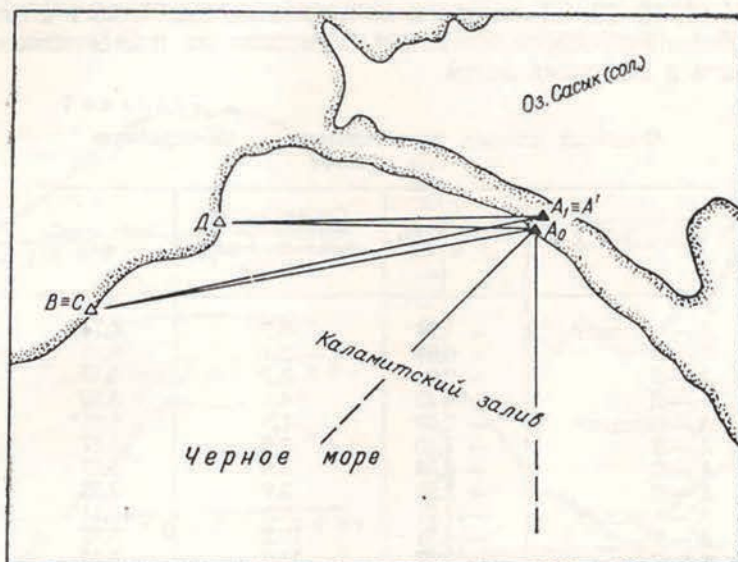


Рис. 1. Схема расположения пунктов.

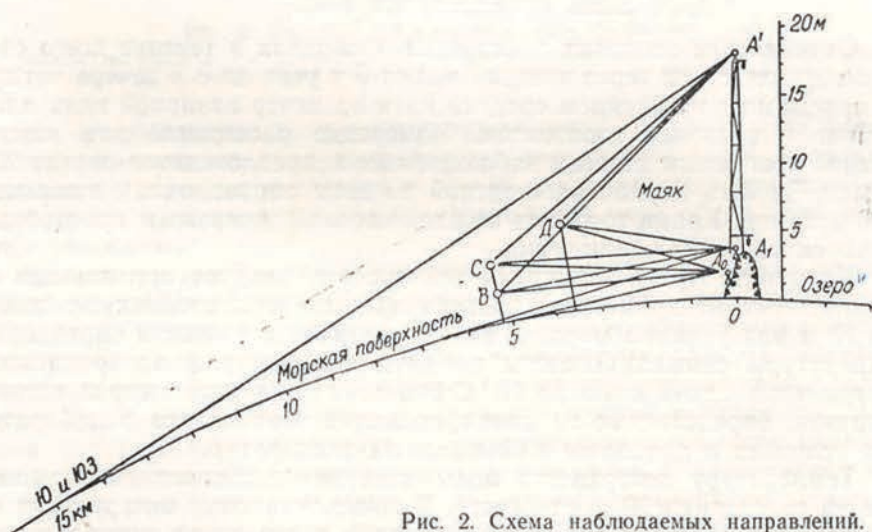


Рис. 2. Схема наблюдаемых направлений.

Пункты сети (см. рис. 1 и рис. 2) располагались на берегу в непосредственной близости уреза воды и представляли собой местные сооружения морской сигнализации, пункты триангуляции и специальные визирные цели.

Длина линий колебалась в пределах 3—15 км и определена из решения многократных обратных засечек с относительной ошибкой не более 1 : 50 000. Высота визирных целей и инструментов определена из нивелирования III класса.

В табл. 1 приведена характеристика наблюдаемой сети пунктов.

Измерения зенитных расстояний проводили теодолитом ОТ-02. Инструмент устанавливали на штативе  $A_0$  и  $A_1$  при наблюдениях с высоты

1,8 и 3,5 м и на століке маяка  $A'$  при наблюдениях с высоты 17,9 м над уровнем моря.

Зенитные расстояния по всем направлениям, включая видимый горизонт по южному и юго-западному направлению с азимутами соответственно 180 и 225°, измеряли из пункта  $A_1$  15, 16, 17, 24 августа, из пункта  $A'$  18, 19, 22, 23 августа и из пункта  $A_0$  20, 21, 25 и 26 августа. При наблюдениях особое внимание обращали на постоянство высоты инструмента и визирных целей.

Таблица 1  
Основные данные, характеризующие наблюдаемую сеть пунктов

Название сторон	Превышение, м	Средняя высота визирного луча над водной поверхностью, м	Длина линий, км
$A_0$ —горизонт	— 1,76	0,9	4,74*
$A_0$ — $B$	+ 0,64	2,1	5,15
$A_0$ — $C$	+ 2,68	3,1	5,15
$A_0$ — $D$	+ 4,72	4,1	3,50
$A_1$ —горизонт	— 3,50	1,8	6,68*
$A_1$ — $B$	— 1,10	3,0	5,17
$A_1$ — $C$	+ 0,94	4,0	5,17
$A_1$ — $D$	+ 2,98	5,0	3,52
$A'$ —горизонт	—17,91	9,0	15,11*
$A'$ — $B$	—15,51	10,2	5,17
$A'$ — $C$	—13,47	11,2	5,17
$A'$ — $D$	—11,43	12,2	3,52

\* Длина линий, вычисленная при  $k=0$ .

Определение зенитных расстояний проводили в течение всего светлого периода суток через каждый час от 6 ч утра до 8 ч вечера четыре-пять приемами с наведением средней нити на центр визирной цели или в касание с видимым горизонтом. Измерение расстояний для каждой часовой программы по всем наблюдаемым направлениям занимало 25—30 мин. За весь период наблюдений по всем направлениям выполнено 3600 приемов. Кроме того, для каждой часовой программы производили метеорологические наблюдения.

На пункте  $A_1=A'$  измеряли температуру воздуха при помощи аспирационных психрометров, подвешенных на кронштейнах на высоте 4 и 17 м над уровнем моря. С целью увеличения точности определения температуры снимали отсчеты по двум термометрам аспирационного психрометра с точностью до 0,1°С и в показания термометров вводили поправки, определенные из компарирования термометров в лабораторных условиях в диапазоне наблюдаемых температур.

Температуру поверхности воды измеряли поплавковым термометром на расстоянии 20 м от берега. В точке установки инструмента определяли атмосферное давление anerоидом и относительную влажность суточным волосяным гигрографом. На пункте  $D$  измерения метеорологических элементов (температура воды и воздуха, влажность воздуха и атмосферное давление) проводила Евпаторийская морская гидрометеостанция в 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч. Для каждой часовой программы определяли скорость ветра при помощи анемометра, регистрировали направление ветра, облачность и по пятибальной шкале оценивали качество изображений визирных целей.

Учитывая, что погода была примерно одинаковой для всего периода наблюдений, вычисляли средние почасовые значения метеоэлементов отдельно для трех установок инструментов, которые приведены в табл. 2—4. По средним значениям построен график дневного хода основных метеоэлементов (рис. 3).

Остановимся на анализе основных метеоэлементов. Анализируя дневной ход температуры поверхности воды, следует отметить, что максимум ее наступает в 13—16 ч, то есть на 1—3,5 ч запаздывает во времени от момента максимальной высоты Солнца. В периоды восхода и захода Солнца температура воды на 2—3°С меньше максимального суточного значения, причем утренние значения температуры занижены в среднем на 1°С по сравнению с вечерними значениями. Следует от-

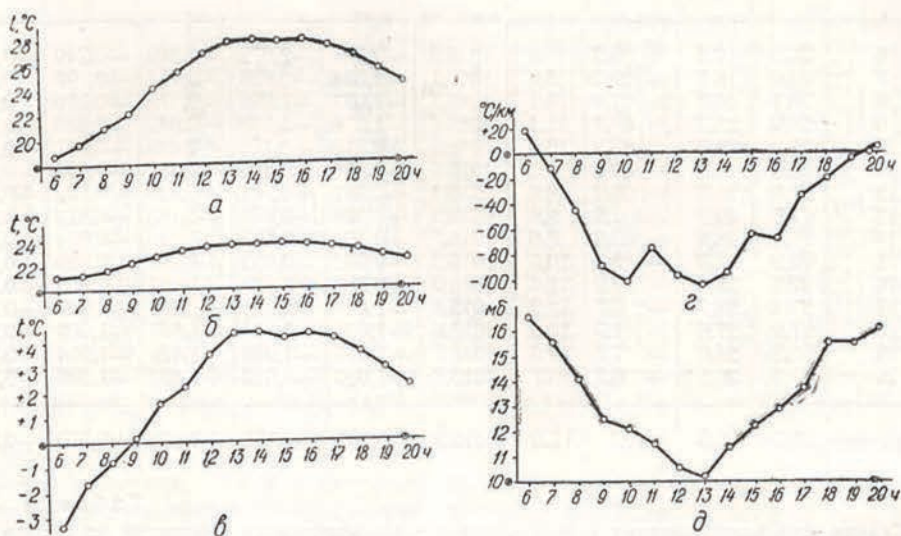


Рис. 3. Дневной ход основных метеоэлементов:

а — температура воздуха; б — температура поверхности воды; в — разность температур воздуха и воды; г — вертикальный температурный градиент; д — влажность воздуха.

метить, что амплитуда хода температуры воздуха в 2,5—3 раза больше амплитуды дневного хода температуры поверхности воды. Максимум температуры воздуха наступает в 13—16 ч и подвержен значительным колебаниям, а дневной его ход в значительной мере обусловлен погодными условиями.

Влажность имеет ярко выраженный дневной ход с минимальными близполуденными значениями. В утренние и вечерние часы наблюдается возрастание влажности воздуха. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Перед восходом солнца температура воздуха достигает минимального значения, наблюдается максимум относительной влажности. После этого начинается прогревание земной поверхности, испарение незначительно возрастает и относительная влажность уменьшается в результате повышения температуры воздуха. С нагреванием почвы быстро усиливается конвекция, происходит интенсивное перемешивание верхних более сухих масс воздуха с нижними более влажными массами. В это время пресобладает вертикальный обмен над испарением и абсолютная влажность в нижних слоях уменьшается, что и приводит к минимальным значениям относительной влажности к 12—14 ч, то есть во время наибольшего развития вертикального обмена. После этого конвекционные токи уменьшаются, что ведет к увеличению влажности воздуха в вечерние часы вплоть до момента захода Солнца.

Атмосферное давление в дневной период незначительно изменяется (1—2 мб) и определяется также погодными условиями.

Что касается вертикального температурного градиента, который, как показано в работе [3], в основном определяет изменение коэффициента вертикальной рефракции, то в условиях песчаного побережья, за исключением утренних и вечерних периодов, наблюдается нормальная

Таблица 2

Средние почасовые значения метеозаэментов и коэффициентов рефракции на пункте А<sub>0</sub>

Часы	Метеозаэменты					Коэффициенты рефракции по направлениям				
	Температура поверхности воды, °С	Температура воздуха, °С	Температурный градиент, °С/км	Влажность, мб	Давление на уровне моря, мб	Ю	Ю-З	В	С	Д
6	20,0	17,4	+ 9,2	16,4	1016,6	-2,031	-2,072	-0,219	-0,249	-0,212
7	20,0	18,1	- 19,2	15,6	1016,7	-2,084	-2,088	-0,174	-0, 97	-0,194
8	20,1	19,2	- 41,4	14,1	1016,7	-1,977	-1,959	-0,179	-0,169	-0,162
9	20,9	21,2	- 84,7	11,4	1016,6	-1,376	-1,130	-0,042	-0,036	-0,067
10	21,2	24,2	- 83,2	10,8	1016,8	+0,319	+0,189	+0,419	+0,187	+0,007
11	21,9	25,8	- 69,2	9,2	1016,6	+0,585	+0,499	+0,651	+0,489	+0,196
12	21,6	28,3	- 95,2	8,6	1016,4	+0,881	+0,761	+0,920	+0,702	+0,434
13	21,6	29,3	-101,9	8,6	1016,6	+0,996	+0,996	+1,163	+0,812	+0,606
14	21,8	28,8	- 83,6	8,6	1016,7	+0,999	+0,977	+1,248	+0,954	+0,588
15	22,2	28,8	- 19,2	10,3	1016,2	+0,982	+0,952	+1,282	+0,989	+0,866
16	22,2	28,6	- 19,2	11,4	1016,0	+0,983	+1,002	+1,402	+1,005	+0,927
17	21,8	28,7	- 6,7	12,2	1015,8	+1,049	+1,055	+1,534	+1,007	+0,844
18	21,9	27,6	- 1,9	14,2	1015,8	+1,094	+1,104	+1,661	+1,009	+0,760
19	21,2	27,0	+ 7,7	13,6	1015,7	+1,025	+1,020	+1,429	+1,014	+0,724
20	21,0	26,1	+ 6,7	15,7	1015,6	+1,003	+1,016	+1,420	+1,026	+0,555
Среднее	21,3	25,3	-40,1	12,0	1016,3	+0,163	+0,155	+0,834	+0,570	+0,392

Таблица 3

Средние почасовые значения метеозаэментов и коэффициентов рефракции на пункте А<sub>1</sub>

Часы	Метеозаэменты					Коэффициенты рефракции по направлениям				
	Температура поверхности воды, °С	Температура воздуха, °С	Температурный градиент, °С/км	Влажность, мб	Давление на уровне моря, мб	Ю	Ю-З	В	С	Д
6	22,6	18,9	+ 5,1	17,3	1014,6	-0,935	-0,688	-0,091	-0,094	-0,035
7	22,8	20,0	- 4,2	15,3	1014,6	-0,983	-0,675	-0,055	-0,079	-0,095
8	23,2	21,6	- 45,2	13,5	1014,8	-0,694	-0,546	+0,016	-0,045	-0,081
9	23,6	22,8	-102,9	12,6	1014,9	-0,638	-0,649	-0,051	-0,111	-0,211
10	24,0	23,6	- 89,4	11,8	1014,9	-0,474	-0,358	-0,008	-0,033	-0,168
11	24,4	24,1	- 77,6	11,6	1014,8	-0,451	-0,247	+0,059	-0,013	-0,139
12	24,8	24,2	- 40,1	10,3	1014,8	-0,214	-0,106	+0,097	+0,001	-0,096
13	25,1	25,6	- 54,4	8,3	1014,6	+0,014	+0,109	+0,136	+0,016	-0,130
14	25,2	26,3	- 43,2	11,6	1014,6	+0,265	+0,315	+0,244	+0,074	-0,079
15	25,0	26,6	- 56,2	11,6	1014,3	+0,264	+0,284	+0,335	+0,173	-0,046
16	24,9	27,2	- 66,0	12,3	1014,0	+0,309	+0,386	+0,481	+0,250	+0,130
17	24,7	26,4	- 18,7	13,0	1014,4	+0,362	+0,438	+0,501	+0,250	+0,154
18	24,5	26,6	- 26,9	15,0	1013,7	+0,495	+0,565	+0,452	+0,152	+0,228
19	24,0	25,0	- 6,7	16,7	1014,1	+0,395	+0,415	+0,420	+0,220	+0,104
20	23,6	23,8	+ 4,3	16,8	1014,2	+0,260	+0,300	+0,358	+0,287	+0,077
Среднее	24,2	24,2	- 39,5	13,2	1014,2	-0,135	-0,030	+0,193	+0,070	-0,026

стратификация температуры, то есть понижение температуры с высотой. В утренние и вечерние часы наблюдается инверсионное строение приземного слоя атмосферы. Разрушение ночного инверсионного строения наступает в течение 2 ч после восхода и восстановление за 1—1,5 ч до захода Солнца. Приземный слой атмосферы в условиях песчаного побережья характеризуется значительными вертикальными градиентами, что указывает на наличие восходящих и нисходящих движений воздушных масс, возникающих вследствие турбулентности в условиях безразличного и неустойчивого равновесия. Кроме того, следует заметить, что

Таблица 4

Средние почасовые значения метеозлементов и коэффициентов рефракции на пункте А'

Часы	Метеозлементы					Коэффициенты рефракции по направлениям				
	Температура поверхности воды, °С	Температура воздуха, °С	Температурный градиент, °С/км	Влажность, мб	Давление на уровне моря, мб	Ю	Ю-З	В	С	Д
6	20,8	20,0	+ 13,4	15,9	1013,4	+0,035	+0,079	+0,166	+0,013	+0,035
7	20,9	20,7	- 11,5	15,8	1012,9	+0,052	+0,091	+0,134	+0,030	+0,037
8	21,6	21,9	- 49,0	14,6	1012,8	-0,071	+0,091	+0,152	+0,053	+0,002
9	22,1	23,0	- 81,8	13,4	1012,8	-0,087	+0,112	+0,104	+0,017	-0,063
10	22,6	24,5	-129,3	13,6	1013,2	+0,191	+0,173	+0,128	+0,075	-0,051
11	23,0	26,0	- 77,4	13,6	1013,0	+0,153	+0,192	+0,168	+0,067	-0,065
12	23,5	27,8	-155,3	12,7	1013,4	-0,178	+0,202	+0,195	+0,100	+0,016
13	23,7	28,3	-159,6	13,5	1013,0	+0,203	+0,220	+0,234	+0,140	+0,042
14	23,5	28,3	-159,1	13,8	1012,9	-0,187	+0,220	+0,212	+0,146	+0,083
15	23,6	27,6	-118,3	14,6	1012,7	+0,184	+0,207	+0,267	+0,165	+0,140
16	23,7	27,6	-123,0	14,8	1012,4	+0,179	+0,226	+0,284	+0,189	+0,137
17	23,4	27,0	- 75,9	15,8	1012,7	+0,190	+0,241	+0,177	+0,153	+0,102
18	23,0	25,6	- 32,2	17,3	1012,5	+0,176	+0,215	+0,274	+0,123	+0,119
19	22,6	24,3	- 13,0	16,1	1012,4	+0,167	+0,193	+0,173	+0,085	+0,061
20	22,1	23,2	- 1,0	15,6	1012,4	+0,131	+0,177	+0,139	+0,090	+0,035
Среднее	22,7	25,0	- 78,2	14,7	1012,8	+0,146	+0,176	+0,187	+0,096	+0,042

как в утренние, так и в вечерние часы при ветреной погоде наступают периоды спокойных изображений, которые наиболее благоприятны для производства геодезического нивелирования над сушей [1]. Однако, как будет показано ниже, в прибрежных районах в это время геодезические измерения для низких лучей визирования могут быть перегружены значительными рефракционными ошибками.

Переходим к анализу закономерностей дневного изменения коэффициента вертикальной рефракции.

По средним часовым значениям зенитных расстояний наблюдаемых направлений для трех установок инструмента были вычислены средние почасовые значения коэффициентов вертикальной рефракции по формуле

$$k = \frac{2R}{s \cdot \rho''} \cdot \Delta z'' \quad (1)$$

где  $R$  — средний радиус кривизны эллипсоида Красовского для средней широты района  $\varphi = 45^\circ 12'$ ;  $s$  — расстояние между пунктами;  $\Delta z'' = z_0 - z$  — разность теоретического и измеренного зенитного расстояния;  $\rho'' = 206265''$ .

Теоретическое зенитное расстояние определяли по формуле

$$\operatorname{ctg} z_0 = \frac{H_2 - H_1}{S} - \frac{s}{2R} \quad (2)$$

где  $H_2$  и  $H_1$  — абсолютные высоты визирной цели и инструмента.

Поправки за уклонение отвесных линий и непараллельность уровней поверхностей из-за отсутствия данных не учитывались. Коэффициент вертикальной рефракции для видимого горизонта по южному и юго-западному направлению вычисляли по формуле

$$k = 1 \mp \frac{R}{2h} \cdot \operatorname{tg}^2 n \quad (3)$$

где  $h$  — высота инструмента над морской поверхностью;  $n = z - 90^\circ$  — наклонение видимого горизонта.

По значениям средних почасовых коэффициентов земной рефракции, наблюдаемых направлений В, С, Д, включая видимый горизонт по южному и юго-западному направлениям, построен график дневного хода (рис. 4). Их значения приведены в табл. 2—4.

Анализ дневного хода коэффициента вертикальной рефракции показывает его характерные особенности по сравнению с сушей и большими континентальными водоемами.

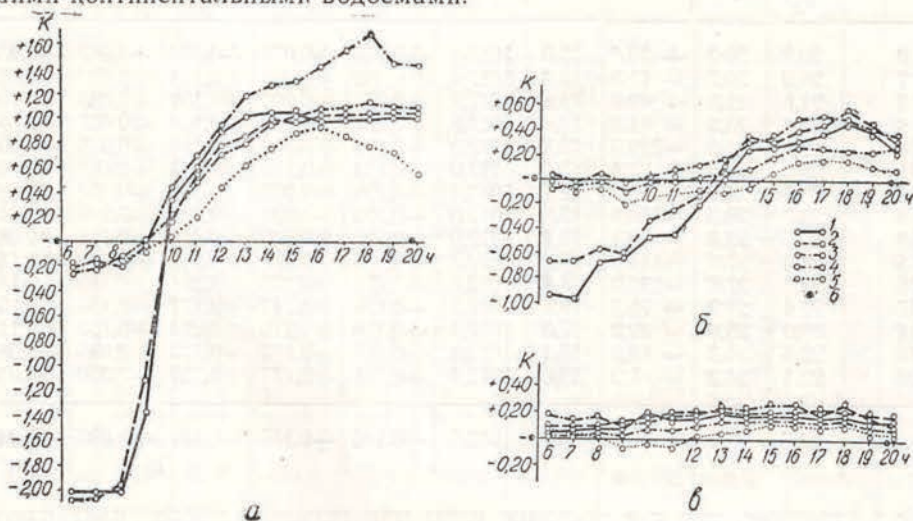


Рис. 4. Дневной ход коэффициентов вертикальной рефракции:

*a* — установка инструмента в точке  $A_0$ ; *б* — установка инструмента в точке  $A_1$ ; *в* — установка инструмента в точке  $A'$ ; 1 — южное направление; 2 — юго-западное направление; 3 — направление В; 4 — направление С; 5 — направление Д; 6 — восход и заход солнца.

Для низких лучей визирования (1—6 м) коэффициенты рефракции принимают большие отрицательные значения в утренние часы и большие положительные значения в близполуденное и вечернее время. Характерной особенностью дневного хода коэффициента земной рефракции над большими водными поверхностями является то, что с уменьшением средней высоты наблюдения резко меняется закон его изменения и увеличивается амплитуда его дневного хода. Это обстоятельство ярко выражено для пунктов  $A_0$  и  $A_1$ , для которых средняя высота визирных лучей над морской поверхностью колеблется в пределах 0,9—5,0 м. Переход через нулевые значения происходит в моменты выравнивания температуры воды и воздуха и наступает к 9—13 ч в зависимости от высоты инструмента и погодных условий, определяющих общее температурное поле прибрежной и береговой зоны. Следует отметить, что если дневное колебание коэффициента вертикальной рефракции над сушей в зимний период составляет 0,10—0,80 [6], в весенний 0,08—0,25, а над водной поверхностью континентальных водоемов от —0,47 до 1,14 [2], то в прибрежной зоне больших водных поверхностей от —2,09 до +1,66. Эти экстремальные значения превосходят предельные значения, полученные другими исследователями над поверхностью моря.

Таким образом, в прибрежной зоне КЗР может достичь очень больших значений, колеблясь в весьма широких пределах. Интересно, что дневной ход КЗР находится в определенной связи с разностью температур воды и воздуха. Если температура воздуха меньше температуры воды, то для низких визирных лучей коэффициент принимает отрицательные значения и, наоборот, если температура воздуха больше температуры воды, наблюдаются положительные значения коэффициентов рефракции. С повышением высоты визирного луча эта связь ослабевает и уже для высоты 7—10 м наблюдается обычный дневной ход, сходный с ходом КЗР над континентальными водоемами и сушей.

На основании изложенного можно сделать такие выводы:

1. Дневной ход коэффициента земной рефракции в прибрежной зоне больших водных поверхностей имеет свои характерные особенности, которые вызваны особым режимом теплообмена между сушей и морем. Различие температурных полей побережья и моря является основным источником формирования аномальных коэффициентов вертикальной рефракции.

2. С увеличением высоты визирного луча возрастает амплитуда кривой дневного хода коэффициента вертикальной рефракции.

3. В условиях приводного слоя не наблюдается выравнивания коэффициентов по направлениям, как это имеет место над сушей в периоды спокойных изображений.

4. При наблюдении предметов на равных высотах под разными азимутами, несмотря на однообразие подстилающей поверхности, коэффициенты могут отличаться друг от друга, то есть в условиях приводного слоя происходит не только асимметрия наклона видимого горизонта, но и асимметрия наблюдаемых объектов, расположенных на незначительной высоте над водной поверхностью, и обусловлено это явление различным горизонтальным распределением температуры.

5. Дневной ход КЗР находится в определенной связи с разностью температур воды и воздуха, особенно для низких визирных лучей. С повышением высоты луча эта связь ослабевает.

6. Эффективным средством уменьшения ошибок рефракционного происхождения при геодезических измерениях в условиях прибрежной зоны больших водных поверхностей является увеличение высоты визирного луча. Если увеличение высоты до 7—10 м по местным условиям недосягаемо, то необходимо производить геодезические измерения в моменты выравнивания температуры воды и воздуха, то есть приближать измерения к моменту нулевых вертикальных и горизонтальных градиентов в зоне побережье—водная поверхность. Отыскание таких моментов не вызывает особых затруднений. Отметим также, что эти моменты особенно приемлемы для свето- и радиоизмерений, так как среднее значение метеоэлементов, определяемых на концах измеряемой линии, более точно характеризует состояние атмосферы по электромагнитному лучу. Одним из средств эффективного уменьшения влияния суши является установка геодезических инструментов в более мористой точке. Для этого целесообразно использовать всевозможные береговые сооружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джуман Б. М. К вопросу о выгоднейшем времени измерения зенитных расстояний. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1964, вып. 1.
2. Дрок М. К. О влиянии вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании через водные пространства. — «Научные записки Львовск. политехн. ин-та», 1962, вып. 85.
3. Изотов А. А. и Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.
4. Казанский К. В. Земная рефракция над обширными водными поверхностями. Л., Гидрометеиздат, 1966.
5. Маслич Д. И. Влияние рефракционного поля обширных водных водоемов на геодезические измерения. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1966, вып. 5.
6. Маслич Д. И. [и др.]. Исследование закономерностей изменения коэффициента рефракции в зимний период. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1968, вып. 7.
7. Селиванов С. В. Исследование земной рефракции на Финском заливе. — «Записки по гидрографии», 1936, № 2.

Работа поступила в редколлегию 11 мая 1973 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.