

*Д. И. МАСЛИЧ, С. С. ПЕРИИ*

## **ОСОБЕННОСТИ РЕФРАКЦИОННОГО ПОЛЯ НА МОРСКИХ ТРАССАХ В ПРИБРЕЖНОМ СУБТРОПИЧЕСКОМ РАЙОНЕ**

В последние годы выполнены важные исследования по выявлению закономерностей изменения рефракции над морской поверхностью [1—6], которые, однако, не позволяют в полной мере осветить все вопросы, связанные с необходимостью прогнозирования, учета или исключения действия рефракции при измерениях на морских трассах, особенно для прибрежных районов. Учитывая это, мы провели специальные исследования на морских трассах в прибрежной зоне.

Для получения экспериментальных данных выбрали участок Черного моря, примыкающий к горной долине с влажным субтропическим климатом. Период наблюдений характеризовался в основном облачной погодой с осадками. Наблюдательная станция и визирные цели располагались на берегу вдоль небольшого за-

лива, примыкающего к устью реки. Визирные цели были окрашены в черный цвет с белой полосой посередине. В центре белой полосы сделано отверстие для электрической лампочки, применяемой в ночных наблюдениях. Ширина белой полосы визирной марки рассчитана в зависимости от расстояния к цели и равна удвоенной угловой величине толщины горизонтальной нити теодолита. Конструкция такой визирной цели значительно увеличивает точность наблюдений, а также обеспечивает быстрое обнаружение и наведение сетки нитей теодолита в цель. Было выбрано пять исследуемых направлений (рис. 1) — М1, М2, М3, «Маяк» и «Горизонт».

На пункте наблюдения ПН установили теодолит ОТ-02 и оборудовали метеопост. Измерения зенитных расстояний проводили круглосуточно через каждый час тремя приемами с наведением теодолита на центр белой полосы визирной цели в дневное

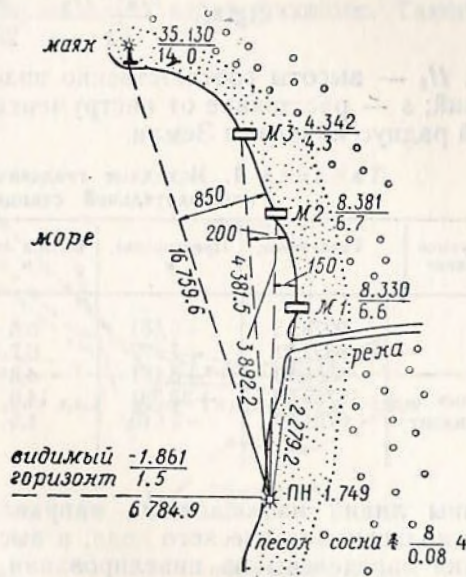


Рис. 1. Схема экспериментального полигона.

✱ ПН 1.749	пункт наблюдения и его высота
▭ М1 8.330 6.6	визирная цель, числитель — высота цели знаменатель — эквивалентная высота
✱	маяк

время и на центр светящейся лампы в ночное время суток. Визирование на пункт «Маяк» выполняли в светлое время суток касанием горизонтальной нити на верхний срез площадки, а ночью — на центр светового сигнала маяка. Наблюдение видимого морского горизонта выполняли только в дневное время суток методом касания на видимую поверхность морской воды.

За весь период экспериментальных исследований выполнено 384 серии наблюдений. Каждую часовую серию измерения зенитных расстояний сопровождали измерения метеоэлементов: температуры на разных высотах, давления, скорости ветра, температуры воды.

На основании проведенных исследований оптического теодолита ОТ-02 оказалось, что ошибка собственного измерения зенитного расстояния одним приемом равна  $0''{,}79$ . Средняя квадратичная

ческая ошибка измеренного зенитного расстояния тремя приемами равна  $0'',46$ , а предельная ошибка —  $1'',38$ , которая согласуется со средней квадратической ошибкой, вычисленной по изменению места зенита в серии измерений —  $1'',24$ .

Теоретические зенитные расстояния  $z_0$  находим по формуле

$$\operatorname{ctg} z_0 = \frac{H_2 - H_1}{s} - \frac{s}{2R}, \quad (1)$$

где  $H_2, H_1$  — высоты соответственно визирной цели и пункта наблюдений;  $s$  — расстояние от инструмента до визирной цели;  $R$  — средний радиус кривизны Земли.

Таблица 1. Исходные геодезические данные наблюдательной станции

Исследуемое направление	Расстояние, м	Превышение, м	Высота луча, м	Отметка визирных целей, Нм	Ср. расстояние от берега, м
ПН-М1	2278,15	+6,581	6,6	8,330	—
ПН-М2	3892,21	+7,177	6,7	8,381	150
ПН-М3	4381,50	+3,121	4,3	4,342	200
ПН-«Маяк»	16759,59	+33,381	14,0	35,130	850
ПН-«Горизонт»	6784,88	-3,610	1,5	0,000	—

Длины линий наблюдаемых направлений определены положением полигонометрического хода, а высоты марок и пунктов наблюдения определены из нивелирования II-го класса. В табл. 1 приведены основные данные по геодезическому обеспечению наблюдательной станции, а также средние высоты визирного луча и средние расстояния от берега наблюдаемых направлений.

Расчет средней квадратической ошибки определения теоретических зенитных расстояний  $m_{z_0}$  выполнен по формуле

$$m_{z_0} = \sqrt{\rho''^2 \left[ \frac{m_h^2}{s^2} + \operatorname{ctg}^2 z_0 \left( \frac{m_s}{s} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где  $m_h$  — средняя квадратическая погрешность определения превышения;  $m_s$  — средняя квадратическая погрешность определения расстояния.

Результаты вычисления  $m_{z_0}$  оказались следующими: для направления М1 —  $0'',36$ , для направления М2 —  $0'',27$ , для направления М3 —  $0'',24$ .

Углы рефракции  $r''$  и ее коэффициенты  $k$  вычисляли по формулам

$$r'' = z_0 - z; \quad k = \frac{2 \cdot R}{\rho'' \cdot s} r'', \quad (3)$$

где  $z$  — измеренное зенитное расстояние.

Рассмотрим особенности стратификации пограничных слоев воздуха над морем, сушей и берегом для района наблюдений. В дневной период воздушные массы пограничного слоя над бере-

гом нагреты больше, чем над морем, что вызывает перемещение воздушных масс с моря на сушу. Такие течения приносят однородные, параллельные слои холодного воздуха на сушу. Движение этих воздушных масс в течение дня постоянное, а их строение стабильное.

В прибрежной зоне строение пограничного слоя воздуха в дневной период имеет нормальную стратификацию. Такое строе-

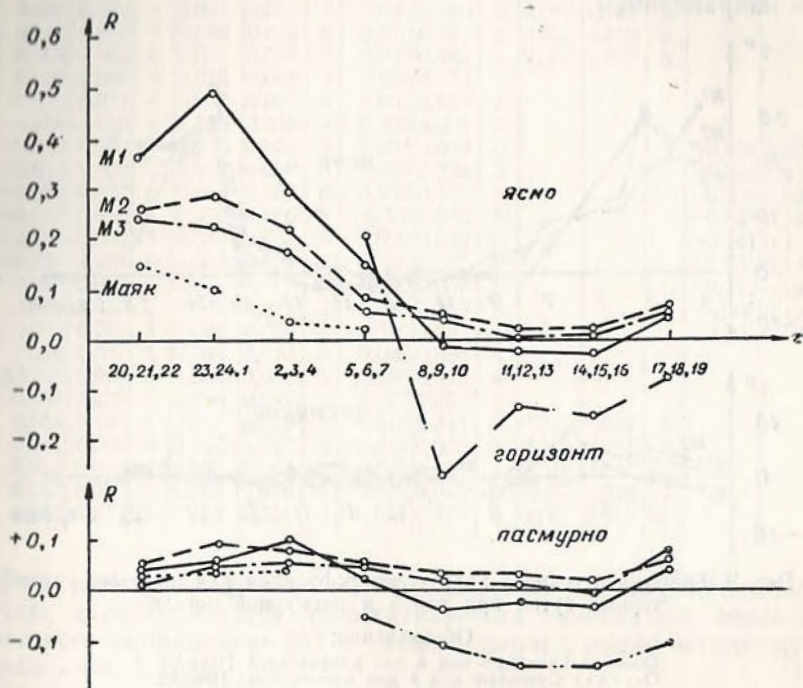


Рис. 2. Графики суточного хода средних значений коэффициентов рефракции для ясной и пасмурной погоды.

Обозначения:

- — Суточный ход  $k$  для направления ПН-М1
- - - - Суточный ход  $k$  для направления ПН-М2
- - · - · Суточный ход  $k$  для направления ПН-М3
- · · · · Суточный ход  $k$  для направления ПН-«Маяк»
- - - - - Суточный ход  $k$  для направления на морской горизонт.

ние обуславливает нулевые значения коэффициента рефракции для морских направлений и отрицательные для береговых.

В ночной период воздушные массы перемещаются с суши на море с одновременным поднятием теплого воздуха в верхние слои. Создается инверсионное строение атмосферы, что приводит к положительной рефракции. Изменение направления ветра с суши на море и перемещение теплового воздуха в верхние слои атмосферы приводит к большим увеличениям коэффициентов рефракции.

В начале ночного периода наблюдается непостоянство стратификации воздуха, когда земля отдает тепло атмосфере. По мере

остывания подстилающей поверхности образуется однородная стратификация.

Приведенные выше априорные заключения о характере стратификации приводных и приземных слоев воздуха над морем, сушей и на берегу и влияние их на рефракцию подтвердились по результатам метеорологических наблюдений и при анализе суточного хода углов и коэффициентов рефракции, полученных по всем пяти направлениям.

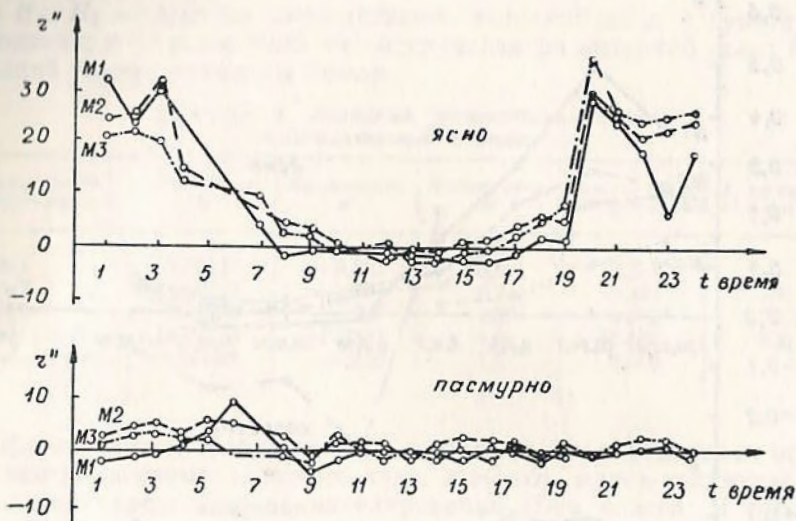


Рис. 3. Графики суточного хода углов рефракции для наиболее характерных суток при ясной и пасмурной погоде.

Обозначения:

- — Суточный ход  $k$  для направления ПН—М1
- - - - Суточный ход  $k$  для направления ПН—М2
- - . - Суточный ход  $k$  для направления ПН—М3.

Ввиду обширности полученных экспериментальных данных мы приводим здесь усредненные значения суточного хода угла рефракции, коэффициента рефракции или суточный ход этих значений для наиболее характерных дней в виде графиков или таблиц. Все наблюдения разделены на две группы: выполненные при пасмурной погоде и при ясной. На рис. 2 показаны графики суточного хода средних значений коэффициентов рефракции для ясной и пасмурной погоды; усреднения выполнены для трехчасовых промежутков времени. На рис. 3 представлены графики суточного хода углов рефракции для наиболее характерных дней при ясной и пасмурной погоде. В табл. 2 приведена сводка почасовых средних значений  $k$ , количество серий, по которым получено  $k$  и средние квадратические ошибки  $m_k$  для пасмурной погоды, а в табл. 3 то же — для ясной погоды.

Из анализа графиков суточного хода рефракции следует, что ее значение находится в пределах  $-6'' \dots +36''$ . Такие искажения значительно превышают инструментальные погрешности.

Таблица 2. Средние почасовые значения коэффициентов рефракции и их средние квадратические ошибки для пасмурной погоды

Час	M1			M2			M3			„Маяк“			„Горизонт“		
	k	m <sub>k</sub>	n	k	m <sub>k</sub>	n	k	m <sub>k</sub>	n	k	m <sub>k</sub>	n	k	m <sub>k</sub>	n
1	0,047	0,076	5	0,090	0,043	5	0,042	0,081	3	0,029	0,020	4			
2	0,085	0,065	7	0,061	0,052	7	0,046	0,040	5	0,049	0,041	5			
3	0,116	0,060	6	0,098	0,036	6	0,076	0,032	4	0,056	0,019	4			
4	0,098	0,064	6	0,088	0,053	6	0,046	0,045	4	0,035	0,042	5			
5	0,036	0,086	4	0,016	0,063	4	0,036	0,078	4						
6	0,015	0,097	4	0,067	0,047	4	0,062	0,045	4						
7	-0,096	0,120	4	0,060	0,040	4	0,039	0,078	3						
8	-0,080	0,034	3	0,001	0,038	3	0,004	0,059	3				-0,018	0,026	3
9	-0,014	0,030	5	0,052	0,030	5	0,044	0,030	5				-0,018	0,026	3
10	-0,029	0,037	6	0,034	0,033	6	0,933	0,036	6				-0,038	0,030	4
11	-0,037	0,060	5	0,030	0,036	5	0,022	0,036	5				-0,143	0,186	3
12	-0,035	0,051	6	0,030	0,033	6	0,020	0,039	6				-0,141	0,177	3
13	-0,025	0,061	6	0,032	0,051	6	0,035	0,047	6				-0,135	0,142	6
14	-0,032	0,033	5	0,021	0,018	5	0,005	0,037	5				-0,212	0,197	2
15	-0,027	0,025	3	0,008	0,022	3	-0,005	0,059	3				-0,206	0,198	2
16	-0,032	0,077	4	0,004	0,049	4	0,010	0,032	4				-0,206	0,198	2
17	0,010	0,087	4	0,040	0,043	4	0,048	0,058	4						
18	0,040	0,079	4	0,054	0,054	4	0,056	0,092	4						
19	0,087	0,079	4	0,076	0,047	4	0,077	0,057	3						
20	0,054	0,046	4	0,057	0,019	3	-0,019	0,015	2	0,044	0,021	3			
21	0,041	0,062	6	0,042	0,017	4	0,011	0,053	3	0,016	0,011	3			
22	0,033	0,018	4	0,053	0,001	3	0,049	0,033	2	0,040	0,017	4			
23	0,069	0,050	4	0,081	0,018	4	0,052	0,046	3	0,051	0,018	5			
24	0,066	0,055	5	0,072	0,021	4	0,051	0,045	3	0,049	0,019	5			

Рефракция, измеренная непосредственно над морской поверхностью, характеризуется положительными значениями; лишь для берегового направления M1 в дневной период имеют место случаи отрицательной рефракции.

Графики суточного хода усредненных коэффициентов рефракции по отдельным направлениям в дневной период (рис. 3) подтверждают рассмотренную выше стратификацию атмосферы. Значение коэффициентов рефракции по всем направлениям в дневном периоде образует прямые параллельные линии. Для морских направлений значения  $k$  значительно меньше, чем над сушей как при ясной, так и при пасмурной погоде и колеблются в небольших пределах от  $+0,070$  до  $+0,010$ , а для берегового от  $+0,045$  до  $-0,030$ . Следует отметить, что коэффициенты рефракции на морской горизонт получили отрицательные значения как при ясной, так и пасмурной погоде, колеблясь в пределах от  $-0,02$  до  $-0,32$ .

Оценку точности средних значений коэффициентов рефракции на данные периоды наблюдений (по 3 ч) получали по формуле

$$m_k = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \quad (4)$$

где  $m_k$  — средняя квадратическая ошибка определения коэффициента рефракции;  $v$  — отклонение отдельного измерения от сред-

Таблица 3. Средние почасовые значения коэффициентов рефракции и их средние квадратические ошибки для ясной погоды

Время, ч	M1			M2			M3			„Маяк“			„Горизонт“		
	$k$	$m_k$	$n$	$k$	$m_k$	$n$	$k$	$m_k$	$n$	$k$	$m_k$	$n$	$k$	$m_k$	$n$
1	0,612	0,566	4	0,279	0,175	4	0,210	0,118	4						
2	0,297	0,234	4	0,246	0,127	4	0,218	0,110	4						
3	0,411	0,414	2	0,281	0,205	2	0,170	0,111	2						
4				0,136	0,93	2	0,110	0,072	2						
5															
6															
7															
8	0,007	0,086	5	0,070	0,039	5	0,043	0,036	5						
9	-0,015	0,054	6	0,043	0,030	6	0,043	0,043	6						
10	-0,015	0,029	6	0,034	0,024	6	0,030	0,037	6				-0,323	0,363	3
11	-0,015	0,028	6	0,034	0,018	6	0,014	0,026	6				-0,231	0,297	6
12	-0,021	0,043	7	0,020	0,029	7	0,007	0,036	7				-0,181	0,242	7
13	-0,022	0,059	7	0,018	0,023	7	-0,004	0,028	7				-0,030	0,249	6
14	-0,013	0,056	7	0,024	0,022	7	0,013	0,035	7				-0,199	0,152	6
15	-0,046	0,031	7	0,026	0,017	7	0,010	0,015	7				-0,147	0,130	5
16	-0,014	0,051	7	0,024	0,021	7	0,004	0,029	7				-0,128	0,136	5
17	0,022	0,057	7	0,045	0,029	7	0,034	0,044	7				-0,035	0,128	5
18	0,031	0,053	7	0,058	0,052	6	0,052	0,071	6				-0,115	0,104	6
19	0,062	0,065	8	0,080	0,054	8	0,093	0,064	8	0,064	0,004	3	-0,111	0,129	4
20	0,293	0,318	5	0,273	0,228	4	0,285	0,240	4	0,146	0,102	4			
21	0,437	0,257	5	0,288	0,148	5	0,257	0,140	5	0,175	0,116	5			
22	0,389	0,206	6	0,235	0,105	6	0,219	0,080	6	0,139	0,073	6			
23	0,555	0,442	3	0,343	0,144	3	0,278	0,089	3						
24	0,359	0,294	5	0,240	0,138	5	0,202	0,113	5	0,158	0,130	2			

него значения;  $n$  — количество определений коэффициента рефракции.

Из этих вычислений, а также из табл. 2 и 3 следует, что при ясной погоде в дневной период средняя квадратическая ошибка определения коэффициента рефракции не превышает 0,050 и остается постоянной на протяжении всего дневного периода. Это еще раз подтверждает правильность ранее сделанных выводов о стабильности коэффициента рефракции в дневной период с 8 до 18 ч. Изменения коэффициента рефракции существенно отличаются от таких изменений над сушей.

Анализ графиков суточного хода коэффициентов рефракции в ночной период указывает на сильные колебания коэффициентов рефракции. Так, для берегового направления колебания равны от +0,300 до +0,500, для морских направлений — от +0,170 до +0,270, что, как было указано, объясняется неоднородностью стратификации в ночной период. Наибольшие ошибки  $m_k$  наблюдаются для берегового направления (от  $\pm 0,250$  до  $\pm 0,450$ ), несколько меньшие — для морских направлений ( $\pm 0,120$ — $\pm 0,150$ ).

Анализ графиков и таблиц суточного хода коэффициентов рефракции показывает, что нет четкого времени установления периодов спокойных изображений в прибрежной зоне. Для береговых и морских направлений существует разность по времени в

установлении однообразной стратификации. Образованные «узлы» пересечений графиков суточного хода коэффициентов рефракции ( $k=0,060$ ) отвечают такой стратификации атмосферы, когда вертикальный градиент температуры уже не равен нулю, а коэффициент рефракции по направлениям одинаков. Характерной особенностью изменений  $k$  на морских трассах при ясной погоде является плавное уменьшение их в утреннее время и заметное возрастание в вечернее, что объясняется колебанием температурного поля над водой. Ошибки определения коэффициентов рефракции в эти периоды еще значительны, но не превосходят ошибок в ночное время. При переменной погоде закон перемещения атмосферных слоев нарушается. Пасмурная погода характеризуется нормальной стратификацией на протяжении суток и небольшими колебаниями температуры воздуха. Это обстоятельство обуславливает незначительный ход коэффициента рефракции (см. рис. 3), а средние квадратические ошибки  $m_k$  минимальны на протяжении суток и приблизительно равны  $\pm 0,050$ .

Из графиков (см. рис. 2 и 3) следует, что при удалении наблюдаемой трассы от берега рефракция уменьшается, а ее изменения становятся более стабильными. Особенно четко проявляется уменьшение колебаний рефракции с увеличением высоты визирного луча над морской поверхностью.

Выполненный анализ позволяет заключить, что ночной период малопримочен для измерения зенитных расстояний, особенно для целей передачи превышений методом тригонометрического нивелирования.

Выполним расчет точности тригонометрического нивелирования для морских трасс. Первоначально рассчитаем среднюю квадратическую ошибку определения коэффициента рефракции из одной серии наблюдений по формуле

$$\mu_k = \frac{2 \cdot R}{\rho'' \cdot s} \mu_z, \quad (5)$$

в которой  $\mu_k = m_{z_0}^2 + m_{z_1}^2$ , а  $m_{z_1} = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}$ , где  $\mu_k$  — средняя квадратическая ошибка определения коэффициента рефракции;  $v$  — уклонение отдельных значений места зенита от среднего арифметического, выведенное из смежных приемов в серии измерений по всем направлениям.

При расчетах ошибка определения расстояния по малости не учтена. Получены следующие результаты расчетов  $\mu_k$ : для направлений ПН — М1 —  $\pm 0,030$ ; ПН — М2 —  $\pm 0,018$  и ПН — М3 —  $\pm 0,016$ . Эти результаты говорят о надежности определения коэффициентов рефракции.

Точность одностороннего тригонометрического нивелирования в благоприятный период с 8 до 18 ч рассчитаем по формуле

$$m_h^2 = \left(\frac{s}{\rho''}\right)^2 m_{z_1}^2 + \left(\frac{s^2}{2R}\right)^2 m_k^2, \quad (6)$$



где  $m_h$  — средняя квадратическая ошибка превышения. При  $m_z \leq 2''$ ,  $s=3$  км,  $R=6376$  км,  $m_h=0,050$ ,  $m_h=0,032$  м, что соответствует 20 мм  $\sqrt{L}$ , или IV классу геометрического нивелирования.

Таким образом, из выполненных исследований вытекает, что значение и амплитуда суточного хода  $k$  рефракции над морем в 2—3 раза меньше, чем над сушей. С удалением от берега и увеличением высоты визирования над морем  $k$  уменьшается. Ночью, в утренние и вечерние часы рефракция положительна, днем нулевая или имеет небольшие отрицательные значения. Такой характер изменения рефракции обусловлен перемещением воздушных масс днем с моря на сушу, а ночью с суши на море. Наиболее благоприятный период измерения зенитных расстояний с минимальными рефракционными искажениями с 8 до 18 ч местного времени. Измерения зенитных расстояний на видимый горизонт над морем удобно выполнять при пасмурной погоде в период с 9 до 15 ч. Коэффициенты рефракции при этом колеблются от  $-0,020$  до  $-0,240$ . При ясной погоде определение коэффициентов рефракции получается неуверенным из-за ошибок наведения.

**Список литературы:** 1. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин И. Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). — Новосибирск: Наука, 1982. 2. Алексеев А. В. Исследование вертикальной рефракции над морской поверхностью. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1976, вып. 24. 3. Казанский К. В. Земная рефракция над обширными водными поверхностями. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. 4. Маслич Д. И. Опыт передачи высоты через значительное водное препятствие тригонометрическим нивелированием. — Геодезия и картография, 1963, № 9. 5. Маслич Д. И. Влияние рефракционного поля обширных водоемов на геодезические измерения. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1966, вып. 5. 6. Тлустяк Б. Т. Исследование закономерностей изменения коэффициентов земной рефракции в прибрежной зоне больших водных поверхностей. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1974, вып. 20.