

А.В. Алексеев, Т.М. Белан

К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Приводятся результаты экспериментальных исследований оптической рефракции над различными подстилающими поверхностями. Статистическая обработка полученных данных позволила сделать заключение о степени возможности использования метеорологических измерений для расчетов угла рефракции в зависимости от типа подстилающей поверхности.

Основные метеорологические параметры атмосферы: температура и давление воздуха, облачность, скорость и направление ветра, вертикальный и горизонтальный градиенты температуры оказывают как непосредственное, так и косвенное влияние на величину и характер изменений значений оптической рефракции в приземном слое атмосферы (ПСА). Сложность влияния этих факторов, их взаимосвязь, ошибки, неизбежные при экстраполяции результатов измерений метеорологических величин в одном или нескольких пунктах на всю трассу, затрудняют определение значений оптической рефракции по метеорологическим измерениям [1, 2].

В целях определения связи между значениями оптической рефракции и метеорологическими величинами нами, совместно с сотрудниками Львовского политехнического института, были проведены экспериментальные исследования в прибрежном районе (Николаевская обл.). Схема места проведения измерений приведена на рис. 1, а параметры трасс, на которых наблюдались зенитные расстояния, — в табл. 1. Измерительные трассы были выбраны таким образом, чтобы имелась возможность определять характер изменений оптической рефракции над разными подстилающими поверхностями: сушей и морем. Как видно из сравнения суточных изменений углов рефракции для двух трасс, диапазон колебаний значений оптической рефракции над сушей более широк, чем над морем (рис. 2). В особенности это проявляется в условиях ясной погоды, когда значения углов рефракции над морем (рис. 2, б) изменяются от 0,23' до 0,79', в то время как над сушей (рис. 2, а) — от 0,77' до 0,60' и суточный ход более ярко выражен.

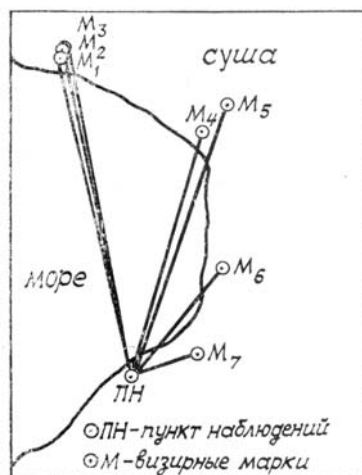


Рис. 1. Схема расположения морского полигона

Измерение углов рефракции производилось оптическим теодолитом ОТ-02 со среднеквадратической ошибкой 1,2''—1,7''. Метеорологические наблюдения, одновременно с измерениями углов рефракции, проводились в нескольких пунктах. Вблизи основного пункта наблюдений (рис. 1) была установлена десятиметровая мачта с расположенными на ней датчиками температуры воздуха (на стандартных уровнях 0,5, 2,0 и 4,0 м), скорости и направления ветра. В море, на расстоянии 50—60 м от берега, была установлена еще одна мачта, на которой измерялась температура воздуха на высотах 0,5 и 2,0 м от уровня воды (ПМ).

Зависимость вертикального угла оптической рефракции от метеорологических величин выражается формулой (см., например, [2]):

$$r = 8.13 SPT^{-2} (0.0342 + \gamma), \quad (1)$$

где P — давление воздуха в мб; T — температура воздуха в К; γ — среднее значение вертикального градиента температуры воздуха вдоль трассы в $^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Таблица 1

Название пункта	Высота инструмента и визирной цели, м	$Z_{\text{теор}}$	Длина линии, S м	h_0 , м
ПН	0,23	—	—	—
M_1	2,85	$90^{\circ} 01' 41,7''$	7523,1	2,51
M_2	2,95	$89^{\circ} 54' 29,9''$	7538,5	6,27
M_3	2,95	$89^{\circ} 46' 43,0''$	7571,4	9,27
M_4	3,16	$90^{\circ} 01' 12,3''$	5965,6	2,79
M_5	5,94	$89^{\circ} 37' 33,7''$	6719,0	11,47
M_6	2,99	$90^{\circ} 00' 07,4''$	3142,5	3,12
M_7	2,94	$89^{\circ} 58' 28,6''$	1328,7	3,24

Формула (1) лежит в основе почти всех методов расчета углов рефракции по результатам метеорологических измерений. Так как главным источником погрешностей этих методов является распространение результатов метеоизмерений, проведенных в одном или нескольких пунктах, на всю трассу, то представляет несомненный интерес определение корреляционной связи значений углов оптической рефракции с метеорологическими величинами при помощи уравнений множественной линейной регрессии [3].

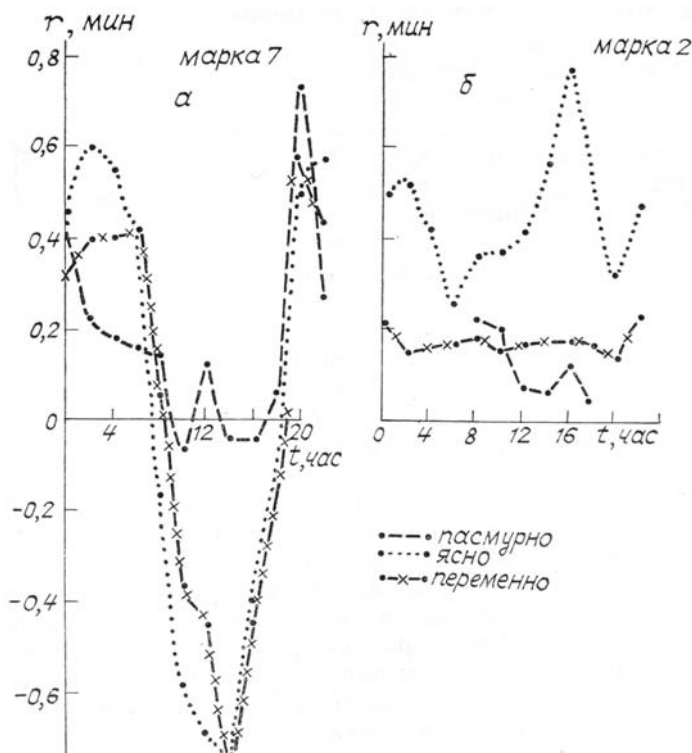


Рис. 2. График суточного хода угла рефракции над сушей и над морем

С этой целью по измеренным углам рефракции для всех семи направлений были определены парные коэффициенты корреляции $k_{M_1 M_{i-1}}$ между этими направлениями (рис. 1), а также сделана оценка полученных коэффициентов корреляции, т. е. вычислены среднеквадратические отклонения σ_k . Результаты вычислений приведены в табл. 2, из которой видно, что парные коэффициенты корреляции между направлениями изменяются в пределах $0,138 \div 0,916$. Для направлений с равными значениями эквивалентной высоты прохождения луча над водной поверхностью значение коэффициентов достаточно высоко, в то время как для направлений с разными эквивалентными высотами величина коэффициентов корреляции заметно меньше. Например, эквивалентные высоты для первого и четвертого направлений (см. табл. 1) равны соответственно 2,51 и 2,79 м при разнице в расстояниях почти два километра. Тем не менее коэффициент корреляции имеет значение 0,916, в то время как для первого и пятого направлений, имеющих разницу в эквивалентных высотах почти 9 м, коэффи-

коэффициент корреляции равен 0,467, хотя по расстояниям эти направления близки. Такая закономерность прослеживается для всех направлений за исключением шестого и седьмого. Шестое направление проходит в непосредственной близости к линии раздела суша—море, а седьмое — над сушей. Корреляционная связь между седьмым и всеми остальными направлениями невысока, независимо от значений эквивалентной высоты и длины трасс, т.к. метеорологические процессы, определяющие величину и характер изменений углов рефракции, зависят от вида и типа подстилающей поверхности.

Таблица 2

Направление	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
M_1	k_{M_1M}	0,869	0,683	0,916	0,467	0,642	0,143
	σ_k	—	0,025	0,037	0,016	0,076	0,055
	n	98	110	102	107	117	121
M_2	$k_{M_2M_i}$	—	0,850	0,873	0,563	0,806	0,146
	σ_k	—	—	0,015	0,019	0,052	0,024
	n	—	203	163	171	219	202
M_3	$k_{M_3M_i}$	—	—	—	0,781	0,756	0,779
	σ_k	—	—	—	0,029	0,027	0,028
	n	—	—	—	172	175	192
M_4	$k_{M_4M_i}$	—	—	—	—	0,321	0,657
	σ_k	—	—	—	—	0,060	0,055
	n	—	—	—	—	221	117
M_5	$k_{M_5M_i}$	—	—	—	—	—	0,251
	σ_k	—	—	—	—	—	0,068
	n	—	—	—	—	—	117
M_6	$k_{M_6M_7}$	—	—	—	—	—	0,208
	σ_k	—	—	—	—	—	0,067
	n	—	—	—	—	—	270

Проанализировав имеющиеся результаты наблюдений углов оптической рефракции по всем направлениям, а также данные метеонаблюдений, для дальнейших расчетов мы выбрали четыре направления: второе, третье, четвертое и седьмое, потому что они характеризуются наиболее полным объемом наблюдений. На основании уравнений множественной регрессии были рассчитаны коэффициенты парной корреляции k между измеренными значениями углов рефракции и основными метеорологическими величинами $r = f(T, P, \gamma)$, полный (или сводный) коэффициент корреляции R , а также среднеквадратические отклонения определения этих коэффициентов.

Применительно к рассматриваемому случаю уравнение множественной регрессии будет иметь следующий вид:

$$r' = \frac{\sigma_r}{\sigma_T} \cdot \frac{D_{rT}}{D_{rr}} \cdot T' + \frac{\sigma_r}{\sigma_P} \cdot \frac{D_{rP}}{D_{rr}} \cdot P' + \frac{\sigma_r}{\sigma_\gamma} \cdot \frac{D_{r\gamma}}{D_{rr}} \cdot \gamma', \quad (2)$$

где $r' = r_i - r$; $T' = T_i - T$; $P' = P_i - P$; $\gamma' = \gamma_i - \gamma$; $\sigma_r, \sigma_T, \sigma_P, \sigma_\gamma$ — среднеквадратические отклонения соответственно угла рефракции, температуры, давления и вертикального градиента температуры воздуха; $D_{rT}, D_{rP}, D_{r\gamma}$ — миноры определителя D_{rr} ; P, T, γ — средние значения метеорологических величин за период наблюдений.

Элементами определителя D_{rr} и его миноров являются коэффициенты парной корреляции (табл. 3) между рассматриваемыми переменными. Полный или сводный коэффициент корреляции между зависимыми переменными можно определить по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{D}{D_{rr}}}. \quad (3)$$

Если парные коэффициенты корреляции, характеризующие степень линейной связанности между двумя переменными, изменяются от -1 до 1 , то полный коэффициент корреляции имеет пределы изменений от 0 до 1 .

коэффициенты	Направления			
	M_2	M_3	M_4	M_7
R	0	0	0	0,297
k_{rT}	0,242	0,060	0,412	-0,181
σ_h	0,068	0,072	0,046	0,039
n	190	203	329	613
$k_{r\Delta T}$	0,622	0,496	0,643	0,045
σ_h	0,059	0,073	0,056	0,096
n	109	109	109	109
$k_{r\gamma}$	0,144	0,058	0,069	-0,282
σ_h	0,071	0,070	0,055	0,037
n	190	203	329	613
$k_{r\gamma_M}$	0,509	0,557	0,410	0,012
σ_h	0,079	0,073	0,089	0,106
n	88	88	88	88
k_{rP}	0,502	0,333	0,325	0,026
σ_h	0,054	0,063	0,049	0,040
n	190	203	329	613

В результате расчетов мы получили, что полный коэффициент корреляции R между углами рефракции и метеорологическими величинами для второго, третьего и четвертого направлений равен нулю. Следовательно, парные коэффициенты корреляции между значениями углов рефракции и температурой воздуха k_{rT} , и давлением k_{rP} , а также и вертикальным градиентом температуры воздуха $k_{r\gamma}$ настолько малы, что составление уравнения линейной регрессии (2) не имеет смысла. Несколько иная картина наблюдается для седьмого направления: здесь полный коэффициент корреляции равен 0,297. Это значит, что для данной трассы метеорологические величины, измеренные в пункте наблюдений, могут быть использованы для определения углов рефракции.

Расчет корреляционной зависимости значений оптической рефракции от вертикального градиента температуры воздуха γ и разности между значениями температуры воздуха и воды ΔT , измеренных над морем (в пункте $ПН$ рис. 1), позволяет, наоборот, получить более тесную связь для направлений 2, 3 и 4, чем для направления 7.

В заключение отметим, что при определении углов рефракции на протяженных трассах по измерениям метеорологических величин необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Во-первых, надо с максимальной тщательностью проводить выбор пунктов для проведения метеорологических наблюдений. Во-вторых, для трасс, проходящих над неоднородными подстилающими поверхностями, надо определять среднеинтегральное значение вертикального градиента температуры воздуха с учетом влияния структуры и типа подстилающей поверхности (например, по методу, предложенному в работах [2, 4]).

1. Казанский К. В. Земная рефракция над обширными водными поверхностями. Л.: Гидрометеиздат. 1966. 189 с.
2. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин И. Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука. 1982. 157 с.
3. Рождественский А. В., Чеботорёв А. И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 423 с.
4. Голицын Г. С. //Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 12. С. 1282–1288.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
16 марта 1988 г.

A. V. Alekseev, T. M. Belan. **On the Optical Refraction Dependence on Atmospheric Parameters.**

The paper presents the results of experimental investigations of optical refraction over various underlying surfaces. Statistical processing of the data obtained allows the conclusion to be drawn on the possibility of the use of meteorological measurements for the refraction angle calculations depending on the underlying surface type.