

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕФРАКЦИИ НА МОРСКИХ ТРАССАХ

В производственных условиях для учета вертикальной рефракции используют коэффициент рефракции k , который или принимают средним, или определяют для данного локального региона. Коэффициент рефракции входит в формулы для вычисления превышения [6], для его среднего значения составлены специальные таблицы как для малых, так и больших расстояний. В последнее время вводится специальная поправка в определяемое превышение электронными автоматическими приборами с использованием среднего значения k . Между тем установлено, что значение коэффициента рефракции непостоянно и зависит от физико-географических условий, периода года и суток, высоты луча, стратификации воздушных масс и многих других факторов.

Теоретически k наиболее полно выражается одним из следующих соотношений:

$$k = \frac{R_3}{R_1}; \quad (a) \quad k = -R_3 \frac{dn}{dh} \sin z/n; \quad (б) \quad k = \kappa_0 + q \frac{c}{h_0} \quad (в), \quad (1)$$

где R_3 и R_1 — радиусы кривизны Земли и траектории волны в данной точке; n и dn/dh — показатель преломления воздуха и его вертикальный градиент; z — измеряемое зенитное расстояние; $\kappa_0 = 18,56 \frac{P}{T^2}$; $q = 668,7 \frac{P}{T^2}$; P и T — давление и температура воздуха;

c — аномальная часть градиента температуры на высоте 1 м над почвой; h_0 — среднеинтегральная высота над подстилающей поверхностью.

Из (1а), (1б) следует, что коэффициент рефракции имеет смысл в том случае, когда изменения вертикального градиента показателя преломления незначительны, т. е. когда траектория волны располагается вдоль земной поверхности. При наблюдении высоких объектов, для которых dn/dh заметно меняется, значение k для учета влияния рефракции использовать нельзя. Формула (1в) позволяет определять коэффициент рефракции, если температурный градиент, который в настоящее время трудно определить, известен вдоль всей трассы.

Исследования показали, что коэффициент рефракции следует представлять из нормальной, или регулярной, части k_n и периодически меняющейся нерегулярной части Δk :

$$k = k_n + \Delta k. \quad (2)$$

Наиболее устойчивое влияние рефракции наблюдается в периоды спокойных изображений, которые наступают обычно через 1...1,5 часа после восхода Солнца и за 1,5...2 часа до его заката.

Однако для различных физико-географических условий моменты установления этих периодов отличаются. В эти периоды колебания изображения замедляются, если температурное поле приближается к однородному или если турбулентные движения замедляются, а величина земной рефракции приближается к нормальной для данного района. Это значит, что коэффициенты рефракции приближаются к нормальным, но они не везде равны некоторой средней величине, например 0,14—0,16. Значение «нормального» коэффициента рефракции зависит от времени года и метеорологических условий данного района. Учитывая, что значения рефракции в периоды спокойных изображений относительно стабильны, для учета рефракции в другие периоды суток можно приводить (редуцировать) значение рефракции на период спокойных изображений с учетом изученного суточного и годового ходов. Таким образом, периоды спокойных изображений можно принять за начало в суточном ходе рефракции.

Наименьшее значение рефракции наступает в полуденное время, но оно меняется от суток к суткам. Максимальных значений рефракция достигает в ночные часы. Быстрые изменения рефракции проходят в период восхода и заката. Поэтому сутки удобно разделить на пять периодов: близполуденное время (13—15); дневное время (11—12, 16—17); период утренних и вечерних спокойных изображений (8—10, 18—20); инверсионный период — промежуток времени около восхода и захода Солнца (6—7, 21—22); ночное время (23—5 часов).

Для трасс, располагающихся над сушей, изменения коэффициента рефракции в эти периоды детально исследованы. Для морских трасс этот вопрос детально не изучался. Учитывая это, мы использовали материалы продолжительных экспериментальных исследований в 1979—1982 гг. на наблюдательных станциях, оборудованных в прибрежных районах северного побережья Черного моря, где проводились круглосуточные экспериментальные определения рефракции по заданию Института оптики атмосферы СО АН СССР. На первой станции наблюдалось семь направлений, часть которых проходила близко к берегу или над сушей, а часть над морской поверхностью (рис. 1). Измерения на этой станции выполнены с двух высот — ярусов: непосредственно у поверхности моря на высоте 2,92 м и на крутом обрывистом берегу на высоте 41,81 м. Длины линий над морем были 6,0...7,5 км, а у берега и над сушей — 1,2...6,7 км. Наблюдения велись в течение трех сезонов: июль-август 1979, май 1980 и май 1981 года.

Вторая наблюдательная станция располагалась над заливом (рис. 2) с одним направлением, расположенным на значительном удалении от берега с длиной линии около 5 км и высотой визирного луча около 8 м.

Для каждой наблюдательной станции были определены плановое и высотное положения всех наблюдаемых направлений. Использование их и результатов измерений зенитных расстояний позволило вычислить коэффициенты рефракции для каждой серии измерений. Полученные материалы по отдельным месяцам были

разбиты на пять перечисленных выше периодов суток. На первой станции выделены нижний и верхний ярусы, так как у них была большая разность высот. Кроме того, выделены отдельно значения коэффициентов рефракции для направлений, расположенных над морем, и для направлений, проходящих над сушей или у берега. Результаты определения средних значений k приведены в таблице, где в круглых скобках указано число серий измерений.

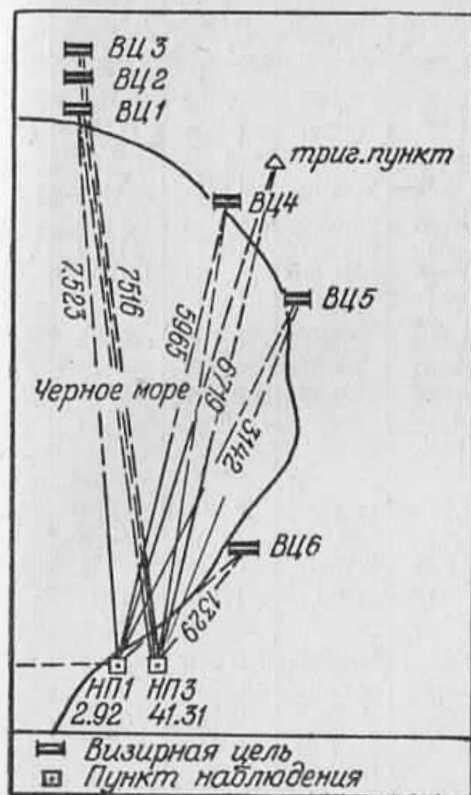


Рис. 1. Схема наблюдательной станции с двумя ярусами (высотами) наблюдений:
1 — визирные цели; 2 — пункт наблюдения.

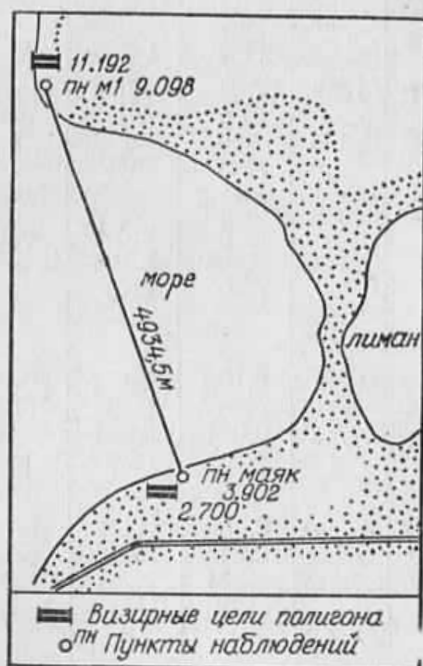


Рис. 2. Схема наблюдательной станции с одним направлением:
1 — визирные цели; 2 — пункт наблюдения.

Представленные данные достаточно полно характеризуют изменения рефракции и ее коэффициента в разные периоды суток весеннего и летнего времени года на морских и прибрежных трассах. Прежде всего, четко видна разность суточного хода для направлений над морем и сушей. Над сушей и в прибрежных районах колебания очень большие — от $-0,30$ — $-0,70$ в блискополуденное время до $0,40$ — $0,50$ в ночной период. На морских трассах эти изменения сильно сглажены и колебания уменьшаются примерно в три раза.

Ярко выражена зависимость значения и изменяемости k от высоты луча над водой. Чем ниже высота визирного луча, тем больше колебания k . Наиболее четко граница видна при среднеинтегральной высоте луча 4 м. Выше этой высоты средние значения

Средние значения коэффициентов рефракции

Период суток	Подсти- лающая поверх- ность	Май 1980		Май 1981	Июль 1979		Август 1979		Август 1982
		Я р у с							
		верхний, $h_{\text{э}} =$ -16,80 м	нижний, $h_{\text{э}} =$ -4,79 м	нижний, $h_{\text{э}} =$ -4,79 м	верхний, $h_{\text{э}} =$ -16,80 м	нижний, $h_{\text{э}} =$ -4,79 м	верхний, $h_{\text{э}} =$ -14,80 м	нижний, $h_{\text{э}} =$ -4,79 м	$h_{\text{э}} =$ -7,15 м
Близ- полу- ден- ный	Море	0,109 (37)	0,047 (81)	0,130 (27)	0,151 (66)	0,265 (104)	0,215 (65)	0,190 (178)	0,164 (42)
	Суша	-0,16 (14)	-0,763 (21)	—	-0,176 (16)	-0,312 (32)	-0,018 (12)	-0,746 (41)	—
Днев- ной	Море	0,124 (35)	0,092 (71)	0,127 (28)	0,145 (76)	0,324 (129)	0,214 (52)	0,158 (105)	0,160 (86)
	Суша	-0,036 (14)	-0,478 (24)	—	0,246 (16)	-0,208 (33)	0,104 (16)	-0,514 (44)	—
Спо- кой- ных изо- бра- жений	Море	0,156 (88)	0,172 (138)	0,100 (41)	0,148 (190)	0,194 (296)	0,193 (177)	0,195 (466)	0,179 (84)
	Суша	0,106 (38)	0,184 (56)	—	0,196 (48)	0,133 (98)	0,161 (38)	0,146 (118)	—
Ин- верси- онный днев- ной	Море	0,136 (29)	0,162 (62)	0,191 (19)	0,218 (49)	0,298 (55)	0,338 (77)	0,301 (263)	0,224 (46)
	Суша	0,071 (13)	0,051 (22)	—	0,288 (14)	0,540 (28)	0,438 (24)	0,441 (95)	—
Ноч- ной	Море	0,156 (26)	0,160 (30)	0,267 (28)	0,289 (36)	0,218 (27)	0,390 (22)	0,360 (77)	0,339 (55)
	Суша	0,144 (12)	0,241 (18)	—	0,414 (14)	0,289 (7)	0,541 (8)	0,422 (31)	—

k в дневной период при нормальной стратификации стабильны и колеблются в пределах 0,11—0,21, а ниже изменяются в более широких пределах от 0,05 до 0,32. Еще больше эти колебания в инверсионный период, когда они находятся в пределах 0,13—0,39.

В периоды спокойных изображений колебания среднего значения k незначительны и находятся в пределах 0,15—0,19, независимо от высоты луча, так как близки к изотермическому значению. Это подтверждает вывод о том, что значение k в периоды спокойных изображений может приниматься за нормальное значение. В близкополуденное время не наблюдается устойчивых минимальных значений, как это имеет место над сушей. Поэтому данный период не может быть принят за исходный.

В инверсионный период, охватывающий ночные часы, а также утренние до начала периода спокойных изображений и вечерние после этого периода, значение k увеличивается по абсолютной величине, а его колебания усиливаются, особенно в утренние и вечерние часы.

Для выявления аналитической зависимости коэффициента рефракции k от основных факторов используем ковариационный анализ. Поскольку наибольшее влияние на величину и изменчивость k оказывают высота луча и вертикальный температурный градиент, представим значение k в следующем виде:

$$k = k_0 + \alpha + \beta + \gamma + \delta h, \quad (3)$$

где k_0 — значение коэффициента рефракции при $\gamma=0$; h — среднеинтегральная высота луча по заданному направлению; γ — вертикальный градиент температуры; α — суммарное влияние остальных факторов на суточный годовой ход; γ и δ — коэффициенты.

Учитывая особенности материала, приведенного в таблице, используем только наблюдения над морем. Сутки мы разбили на пять периодов, и все наблюдения разделим на три группы по месяцам (май, июль, август). Вертикальные градиенты температуры вычисляли и усредняли по результатам метеонаблюдений, выполняемых одновременно с измерением зенитных расстояний. Таким образом, основные предположения сведены к следующему:

$$k_{ij} = k_0 + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \delta h_{ij} + l_{ij},$$

$$\Sigma \alpha_i = 0, \quad \Sigma \beta_j = 0, \quad (4)$$

где k_0 — генеральное среднее значение k ; l_{ij} — ошибки определения значений l_{ij} независимы и распределены по закону $N(0, \sigma^2)$; k_{ij} — значение коэффициента рефракции в i — j -ячейке; i — номер периода, j — номер группы.

Дальнейшая обработка материала выполнена по методу [1], исследуя годовой ход над сушей. В результате вычислений $\gamma = +0,0721$; $\delta = -0,0015$; $k_0 = 0,190$. Таким образом, k можно представить выражением

$$k = 0,190 + 0,072\gamma - 0,0015h. \quad (5)$$

В результате анализа и проведенной статистической обработки большого экспериментального материала по определению рефракции на морских трассах видим, что периоды спокойных изображений над морем — наиболее удобное время для измерения зенитных расстояний или углов наклона. В продолжение этих периодов влияние рефракции стабильно и равно 0,15—0,19; его можно принимать за нормальное среднее значение. Установление этих периодов происходит на 1,5—2,0 часа позже, чем над сушей, а их продолжительность большая, чем над сушей.

В инверсионный период днем и особенно ночью значения рефракции по сравнению с нормальной увеличиваются примерно в 2 раза, они непостоянны, особенно при низких высотах лучей.

Для прибрежных трасс наблюдаются резкие колебания k от отрицательных значений в близполуденное время до преувеличенных в 2—3 раза в ночное время, что характерно для изменений k над сушей.

Список литературы: 1. Хижак Л. С., Маслич Д. И. Исследование годового хода коэффициента рефракции. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6. 2. Маслич Д. И., Хижак Л. С., Глусят Б. Т. и др. Исследование закономерностей изменения коэффициента рефракции в зимний период. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1968, вып. 7. 3. Маслич Д. И. Некоторые общие закономерности влияния вертикальной рефракции на точность геодезического нивелирования. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1969, вып. 9. 4. Маслич Д. И., Хижак Л. С. Исследование зависимости коэффициента рефракции от периода суток и высоты луча. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1969, вып. 10. 5. Маслич Д. И. Основные итоги исследования земной рефракции в горных условиях. — В кн.: 50 лет учреждения Высшего геодезического управления. Львов, 1970. 6. Маслич Д. И. Определение рефракции при наблюдении высоких объектов в атмосфере. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1971, вып. 13.

Статья поступила в редколлегию 31. 12. 83