

А. Сеидов, К.В. Шишаков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ НА ПРИЗЕМНЫХ ТРАССАХ В АРИДНОЙ ЗОНЕ

Исследуется регулярная и случайная оптическая рефракция на приземных трассах в условиях жаркого климата аридной зоны. Изучается суточный ход угла вертикальной рефракции, его зависимость от высоты расположения наблюдаемой мишени и взаимосвязь регулярного хода угла рефракции с дисперсией его случайных флуктуации. Полученные с использованием теории приземного слоя атмосферы Колмогорова-Обухова и теории оптической рефракции расчетные формулы позволили в несколько раз повысить точность рефракционных исследований по сравнению с известным метрологическим методом измерения угла рефракции.

При анализе распространения световых лучей в приземном слое атмосферы и в геодезических измерениях необходимо учитывать поправки, связанные с явлением оптической рефракции [1]. Регулярная рефракция возникает, главным образом, вследствие наличия вдоль трассы луча установившегося высотного градиента температуры, а случайная рефракция – вследствие быстрых пространственно-временных флуктуации температуры [2, 3]. Для условий жаркого климата аридной зоны характерен сильный прогрев подстилающей поверхности, что приводит к развитым температурным процессам и появлению больших вертикальных градиентов температуры в приземном слое атмосферы. Так, в указанных районах разность между температурой подстилающей поверхности и температурой воздуха на высоте двух метров достигает в отдельные летние дни двадцати и более градусов. Такие развитые температурные процессы, в свою очередь, усиливают проявление рефракционных эффектов.

В данной статье представлены результаты исследований регулярной и случайной оптической рефракции на приземных трассах в условиях жаркого климата аридной зоны.

Для выполнения высокоточных рефракционных измерений использовались расчетные формулы, полученные на основе теории оптической рефракции и теории приземного слоя атмосферы Колмогорова – Обухова. Так как окончательное представление этих выражений по своей форме отличается от приведенных в [2], ниже кратко опишем их.

1. Расчет угла вертикальной рефракции при больших градиентах температуры

Рассмотрим известную точную формулу, применяемую для вычисления угла регулярной рефракции на горизонтальных приземных трассах [2]

$$r = \frac{lP}{\alpha_0 T^2} \{\beta_0 + \gamma\}, \quad \gamma = \frac{2}{l^2} \int_0^l \frac{\partial T}{\partial z} x dx, \quad (1)$$

где r – угол рефракции (в угловых секундах), l – длина трассы, м; P – давление воздуха (в гПа); T – температура воздуха, К, $\alpha_0 = 0,123$, $\beta_0 = 0,0342$, z – высота, м.

Так как непосредственное определение входящего в (1) усредненного по трассе вертикального градиента температуры γ , как правило, не представляется возможным, на практике обычно применяют различные его приближенные аппроксимации, основанные на использовании измерений метеопараметров атмосферы в пункте наблюдения. Наиболее точная аппроксимация получается с учетом применения теории приземного слоя атмосферы Колмогорова–Обухова [4]. В ней вертикальный градиент температуры представляется в виде [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T^*}{z} \varphi(\zeta), \quad (2)$$

где

$$T_* = \frac{\Delta T(z)}{\Delta f(z)}, \quad \varphi(\zeta) = \zeta \frac{df}{d\zeta}, \quad \zeta = \frac{z}{L_*},$$

$$f = \begin{cases} \ln \zeta + \mu \zeta, & 0 < z, \\ \ln |\zeta|, & \Gamma \leq \zeta \leq 0, \\ \nu_0 + \nu \zeta^{-1/3}, & \zeta < \Gamma, \end{cases} \quad (3)$$

T_* , L_* – характерные масштабы температуры и длины, $\mu \simeq 10$, $\nu_0 \simeq 0,25$, $\nu \simeq 1,2$, $\Gamma = -0,07$ [6], Δ – приращение по высоте.

Предполагая незначительное изменение масштабов T_* и L_* вдоль трассы светового луча, после подстановки (2), (3) в (1) получим

$$\gamma = \Delta T \gamma_0, \quad (4)$$

где

$$\gamma_0 = \begin{cases} c^2 H^{-1} / \ln(z_2/z_1) + (1 - c^2) / \Delta z, & 0 < \zeta, \\ H^{-1} / \ln(z_2/z_1), & \Gamma \leq \zeta \leq 0, \\ -\frac{1}{3} H^{-4/3} / (z_2^{-1/3} - z_1^{-1/3}), & \zeta < \Gamma, \end{cases} \quad (5)$$

$$H^{-n} = \frac{2}{\Gamma} \int_0^l \frac{x dx}{z^n(x)}, \quad c^2 = 1 / \left[1 + \frac{\mu}{L_*} \frac{\Delta z}{\ln(z_2/z_1)} \right],$$

$z(x)$ – профиль трассы, $\Delta z = z_2 - z_1$, z_2 и z_1 – выбранные высоты измерения метеопараметров атмосферы в пункте наблюдения ($z_2 > z_1$).

Рассмотрим нахождение параметров ξ и c^2 через измерения приращения по высоте скорости ветра Δv . Для этого воспользуемся зависимостью [5]

$$\zeta / \varphi(\zeta) = \text{Ri}' . \quad (6)$$

Здесь $\text{Ri}' = \alpha^2 \text{Ri}$, Ri – число Ричардсона, $\alpha^2 = \alpha^2(\text{Ri})$ – некоторая функция, причем $\alpha^2 \simeq 1$ при $|\xi| \ll 1$ [4, 6].

Из формулы (6) с учетом выражений [4]

$$\text{Ri} = \frac{g}{T} \frac{\partial T / \partial z}{(\partial v / \partial z)^2},$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Delta T}{z} \frac{\varphi}{\Delta f}, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\Delta v}{z} \frac{\varphi}{\Delta f} \quad (7)$$

можно получить

$$\xi = \text{Ri} = \tilde{\text{Ri}}, \quad \Gamma \leq \xi \leq 0,$$

$$c^2 = 1 - \mu \tilde{\text{Ri}} \alpha^2 / \frac{z}{\Delta z} \ln \frac{z_2}{z_1}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения,

$$\tilde{\text{Ri}} = \frac{g}{T} \frac{\Delta T}{(\Delta v)^2} z \ln \frac{z_2}{z_1}.$$

Отметим, что определить входящие в (5) параметр c^2 и интервал изменения ξ также можно через измерения температуры воздуха на трех и более высотах.

Приведенные выражения (1), (4), (5), (8) позволяют вычислять угол вертикальной рефракции на основе измерений приращений ΔT и ΔU в пункте наблюдения.

2. Вертикальная зависимость угла рефракции

При выводе формулы (4) для расчета вертикального градиента температуры предполагалось постоянство масштабов T^* и L^* вдоль всей трассы светового луча. Однако на практике эти условия могут нарушаться (особенно в случае сильно неоднородных трасс), что ставит под сомнение в подобных ситуациях правомерность применения приведенных выше выражений. Осуществить косвенный контроль таких нарушений позволяет анализ вертикальной зависимости угла оптической рефракции. Рассмотрим его последовательно при неустойчивой ($\xi < \Gamma$), безразличной ($\Gamma \leq \xi \leq 0$) и устойчивой ($\xi > 0$) стратификациях атмосферы. В дальнейшем принадлежность используемых параметров указанным стратификациям будем отмечать соответственно верхними индексами N, B, S .

Наиболее простой вид вертикальная зависимость угла рефракции принимает при $\xi \leq 0$ ($\Delta T / \Delta z \leq 0$). В этом случае из выражений (1), (4), (5) нетрудно получить

$$r(t) = \kappa \Delta r(t) + \kappa_0(t). \quad (9)$$

Здесь $\kappa = \kappa^N = H^{-4/3} / \Delta H^{-4/3}$ при $\xi > 0$ и $\kappa = \kappa^B = H^{-1} / H^{-1}$ при $\Gamma \leq \xi \leq 0$, $\kappa_0 = \frac{\beta_0 P}{\alpha_0 T^2} [l - \kappa \Delta l]$,

t – временная координата.

Рассматривая (9) для двух мишеней, расположенных на разных высотах в одном направлении (с условными номерами «1» и «2») и полагая $r = r_1$, $\Delta r = r_2 - r_1$, $\kappa^N = H_1^{-4/3} / (H_2^{-4/3} - H_1^{-4/3})$, $\kappa^B = H_1^{-1} / (H_2^{-1} - H_1^{-1})$, будем иметь

$$r_2(t) = r_1(t) (1 + 1/\kappa) - \kappa_0(t) / \kappa. \quad (10)$$

Значительно более сложная временная вертикальная зависимость получается при $\xi > 0$ ($\Delta T / \Delta z > 0$). Здесь требуется использование уже трех мишеней (так как необходимо дополнительно исключить неопределенный параметр c^2 , зависящий от метеопараметров атмосферы). Для простоты рассмотрим только случай, когда мишени (с условными номерами «1», «2», «3») расположены на расстояниях $l_1 = l_2 \neq l_3$ и имеют высоты $z_1 < z_2 < z_3$ (такое расположение мишеней применялось в наших экспериментах). Тогда из (1), (4) (5) можно найти следующую зависимость:

$$r(t) = \kappa_{21}^S \Delta r_{21}(t) + \kappa_{31}^S \Delta r_{31}(t), \quad (11)$$

где

$$\kappa_{21}^S = \frac{H^{-1}}{\Delta H_{21}^{-1}} - \frac{l}{\Delta l_{31}} \frac{\Delta H_{31}^{-1}}{\Delta H_{21}^{-1}}, \quad \kappa_{31}^S = \frac{l}{\Delta l_{31}}.$$

При $\kappa_{31}^S \gg 1$ из выражения (11) получаем формулу

$$\Delta r_{31}(t) \simeq \tilde{\kappa} \Delta r_{21}(t), \quad (12)$$

где

$$\tilde{\kappa} = \Delta H_{31}^{-1} / \Delta H_{21}^{-1}.$$

Как видно из (9), зависимость (12) будет наблюдаться и при других стратификациях атмосферы (при $\xi \leq \Gamma$ в ней следует принять $\tilde{\kappa} = \Delta H_{31}^{-4/3} / \Delta H_{21}^{-4/3}$).

При применении выписанных выражений для контроля однородности трассы светового луча в них удобно заменять угол рефракции r на разность наблюдаемого в теодолите угла прихода излучения φ и истинного угла направления на объект $\varphi_0 = \text{const}$: $r = \varphi - \varphi_0$. Тогда, как видно из (9), (11), незначительным изменениям масштабов T^* и L^* вдоль исследуемой трассы должны соответствовать следующие условия:

$$\begin{aligned} \varphi(t) - \kappa^{N,B} \Delta\varphi(t) - \kappa_0^{N,B}(t) &\simeq \text{const}, \\ \varphi(t) - \kappa_{21}^S \Delta\varphi_{21}(t) - \kappa_{31}^S \Delta\varphi_{31}(t) &\simeq \text{const} \\ (l_1 = l_2 \neq l_3). \end{aligned} \quad (13)$$

Нарушения временных зависимостей (13) будут указывать на неоднородность метеопараметров атмосферы вдоль трассы распространения светового луча.

3. Взаимосвязь регулярной и случайной оптической рефракции в приземном слое атмосферы

Одной из наиболее важных характеристик случайной рефракции является дисперсия случайных флуктуации средних по приемной апертуре углов прихода светового поля. На практике ее измерение связано с использованием чрезвычайно сложной экспериментальной аппаратуры [3, 7]. Контролировать правильность работы такой аппаратуры помогает взаимосвязь характеристик регулярной и случайной оптической рефракции в приземном слое атмосферы. Такую взаимосвязь можно использовать и при вычислении угла регулярной вертикальной рефракции путем измерения дисперсии случайной рефракции [8]. Учитывая важность отмеченной зависимости, рассмотрим ее более подробно [3, 8].

На горизонтальных трассах дисперсия случайных флуктуации угла прихода светового пучка определяется выражением [9]

$$\sigma_r^2 = \kappa_1 D^{-1/3} \int_0^l c_n^2(x) dx, \quad (14)$$

где D – диаметр приемной апертуры; κ – коэффициент пропорциональности.

Входящая сюда структурная постоянная показателя преломления c_n линейно связана со структурной постоянной температуры c_T [3]:

$$c_n = \kappa_2 c_T P/T^2, \quad (15)$$

где κ_2 – коэффициент пропорциональности.

Из теории приземного слоя атмосферы известно, что структурная постоянная c_T зависит от вертикального градиента температуры [4]:

$$c_T^2 = \kappa_3 [\kappa z]^{4/3} a^2(\xi) [\partial T/\partial z]^2, \quad (16)$$

где κ_3 – коэффициент пропорциональности; $\kappa \simeq 0,4$ – постоянная Кармана. Теоретический вид функции $a^2(\xi)$ часто задают в виде [3]

$$a^2(\xi) = \varphi^{-1}(\xi) [a\varphi(\xi) - \xi]^{-1/3}, \quad (17)$$

а ее экспериментальные представления можно найти в [9, 10].

Используя выражения (3), (6), функцию $a^2(\xi)$ (17) удобно переписать в следующей форме:

$$\alpha^2(\text{Ri}) = (1 - \alpha \text{Ri})^{-1/3} \begin{cases} \alpha^{-1/3} (1 - \mu \alpha^2 \text{Ri}), & \text{Ri} > 0 \\ \alpha^{-1/3}, & \Gamma \leq \text{Ri} \leq 0 \\ -3(\alpha \text{Ri})^{1/3} / \nu, & \text{Ri} < \Gamma. \end{cases} \quad (18)$$

Отсюда видно, что при неустойчивой стратификации атмосферы функция $\alpha^2(\text{Ri})$ быстро насыщается и при $\text{Ri} \ll -1$ стремится к предельному значению $\alpha_m^2 = -3/\nu$.

Подставляя (15), (16) в (14) и предполагая постоянство масштабов T^* , L^* вдоль трассы луча, из формул (1) – (3) окончательно получим

$$r = A + B\sigma_r, \quad (19)$$

где

$$A = \frac{\beta_0}{\alpha_0} \frac{Pl}{T^2}, \quad B = \frac{B_0}{a} D^{1/6} l^{1/2} \text{sign} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

Так как выражение для B_0 оказывается достаточно громоздким, выпишем его только для частного случая, когда вдоль трассы выполняется условие $z(x) \simeq h = \text{const}$:

$$B_0^2 = 1/\alpha_0^2 \kappa_1^{2/3} \kappa_2^2 \kappa_3^{4/3} h^{-4/3} = \text{const} h^{-4/3}.$$

Выражение (19) можно использовать при неустойчивой стратификации атмосферы для вычисления угла вертикальной рефракции через измерения дисперсии случайной рефракции [8] (так как в этом случае $a \rightarrow a_m$, $B \rightarrow \text{const}$, и выражение (19) практически перестает зависеть от метеопараметров атмосферы). Кроме этого, его можно применять для контроля правильности определения дисперсии случайной рефракции посредством проверки условия

$$\varphi(t) - A(t) - B(t) \sigma_r(t) = \varphi_0 = \text{const}. \quad (20)$$

Такой контроль важен при нахождении структурной постоянной показателя преломления C_n и радиуса когерентности Фрида r_0 на основе формул [3, 11]:

$$C_n^2 \simeq \sigma_r^2 D^{1/3} / 2.84 l; \quad (21)$$

$$r_0 \simeq 1.68 [(2\pi / \lambda)^2 C_n^2 l]^{-3/5},$$

где λ — длина волны.

4. Экспериментальное исследование рефракции в приземном слое атмосферы

Экспериментальное исследование оптической рефракции проводилось в летнее время в условиях аридной зоны (при этом температура воздуха достигала 40°C и более). В качестве измерительной аппаратуры использовались стандартный теодолит типа 2Т2 и лазерный сканирующий теодолит [7, 12]. Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью приведенных выше формул. Исследуемые трассы распространения светового луча были выбраны в одном направлении, несколько отличаясь друг от друга по высоте и длине. Они пролегали в предгорной местности и имели сложный профиль подстилающей поверхности. Трассы проходили над участками пустыни, жилыми постройками, пересекали небольшой овраг и шоссе/дорогу. Их высоты изменялись от 2 до 30 м (в овраге). Целью выбора таких неоднородных трасс являлось стремление оценить точность расчета рефракции на местности сложной формы, когда традиционные методы расчета не всегда приводят к удовлетворительным результатам. В качестве измеряемых метеопараметров атмосферы были выбраны P , $T(z_2)$, $T(z_0)$, $\nu(z_2)$. Их измерения проводились в пункте наблюдения на высотах $z_2 = 2$ м, $z_0 = 0,03$ м. Наблюдения угла прихода излучения φ ($\varphi = r + \varphi_0$) осуществлялись на высоте $z_2 = 2,5$ м над уровнем земли. Выбор в качестве z_1 параметра шероховатости z_0 (по определению $\nu(z_0) = 0$) преследовал цель оценить точность расчета при наихудших условиях

(когда Δz максимально) и уменьшить количество измеряемых метеопараметров. Для иллюстрации результатов многочисленных наблюдений были выбраны отдельные сутки с типичными погодными условиями.

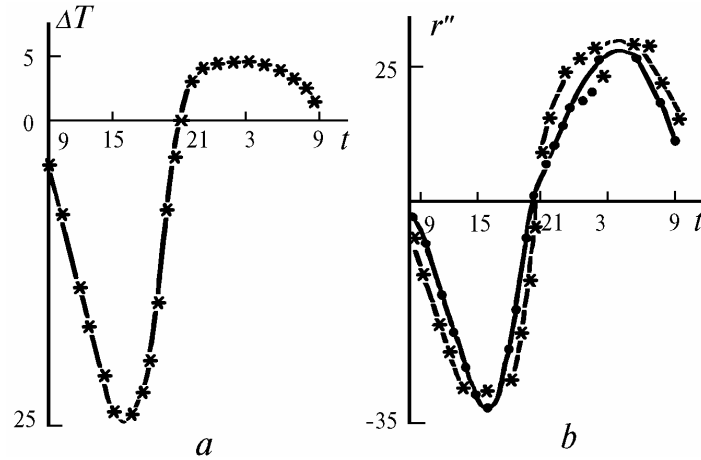


Рис. 1. Суточные зависимости: $a - \Delta T(t)$, $b - r''(t)$ (время t в часах, точки – рассчитанные значения; звездочки – измеренные)

На рис. 1, а показан суточный ход разности температур $\Delta T = T(z_2) - T(z_0)$ в один из таких дней. Из него видно, что в дневное время градиент температуры отрицателен, а в ночное – положителен. Следовательно, в течение суток должны наблюдаться все три стратификации приземного слоя атмосферы. Чтобы избежать трудоемкого измерения профиля трассы $z(x)$ при расчете углов рефракции по формулам (1), (4), использовалось нахождение постоянных параметров γ_0^N ($\xi < \Gamma$) и γ_0^B ($\Gamma \leq \xi \leq 0$) из долговременных наблюдений угла прихода излучения $\varphi(t)$ от выбранной мишени. Для этого применялась формула, получаемая из (1), (4) с учетом зависимости $\varphi(t) = r(t) + \varphi_0$:

$$\gamma_0 \approx \frac{\beta_0}{\sum_{i,j} 1} \sum_{i,j} \frac{\frac{\alpha_0}{l\beta_0} (\varphi_i - \varphi_j) - \frac{P_i}{T_i^2} + \frac{P_j}{T_j^2}}{\Delta T_i \frac{P_j}{T_i^2} - \Delta T_j \frac{P_i}{T_j^2}}, \quad (22)$$

где индексы суммирования $i, j (i \neq j)$ указывают на значения соответствующих величин в моменты времени измерений t_i, t_j .

Данная формула использовалась отдельно для неустойчивой и безразличной стратификации атмосферы. При этом из суммирования исключались отдельные измерения, вклад которых отличался более чем в два раза от среднего для измерений значения γ_0 (т.к. погодные условия на трассе не всегда соответствовали принятым в (4) предположениям: $T_*, L_* = \text{const}$).

В результате для исследуемой трассы длиной 2303 м (длины всех трасс измерялись лазерным дальномером типа «Топаз СП2») были получены значения $\gamma_0^N \approx \gamma_0^B \approx 0,009$. Отметим, что при использовании грубой аппроксимации $\gamma \approx \Delta T / \Delta z$ значение γ_0 оказалось бы равным $\approx 0,5$, что привело бы к расхождению рассчитанных значений r и измеренных (рис. 1, б) почти на порядок.

Более трудоемко вычисление углов рефракции в случае устойчивой стратификации атмосферы ($\xi > 0$). Как видно из (5), для этого необходимо знать функцию $c^2(\tilde{R}i)$. Поэтому данная функция доопределялась отдельно на основании формул

$$c^2 = \frac{\gamma_0^B - 1/\Delta z}{\gamma_0 - 1/\Delta z},$$

$$\gamma_0^s = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\alpha_0 T^2}{lP} (\varphi - \varphi_0) - \beta_0 \right], \quad (23)$$

где истинный постоянный угол φ_0 направления на мишень находился из многочисленных рефракционных наблюдений в различные летние дни при $\Delta T \approx 0$ (кроме этого, он может быть также вычислен с помощью формул (1), (4) при других стратификациях атмосферы для известных значений $\gamma_0^{N,B}$).

Полученные таким образом экспериментальные значения $c^2(\tilde{R}i)$ допускали аппроксимацию линейной зависимостью, в результате чего была восстановлена функция $c^2(\tilde{R}i) \approx 1 - \tilde{R}i / 30$. С помощью этой функции по формулам (1), (4), (5) вычислялись углы рефракции в случае устойчивой стратификации атмосферы. Итоговый, рассчитанный суточный ход угла оптической рефракции по уравнениям (1), (4) показан на рис. 1, б. Из рисунка видно, что для исследуемой неоднородной трассы сложной формы отличие вычисленных углов рефракции от измеренных ($r = \varphi - \varphi_0$) в среднем не превышает 6" (точность теодолита 2Т2 по паспортным данным 2"), что указывает на высокую точность расчетных формул. Относительно суточного хода $r(t)$ следует отметить, что он качественно повторяет суточный ход $\Delta T(t)$, причем в ночное время при $\Delta T > 0$ на значение угла рефракции начинает заметно влиять число Ричардсона.

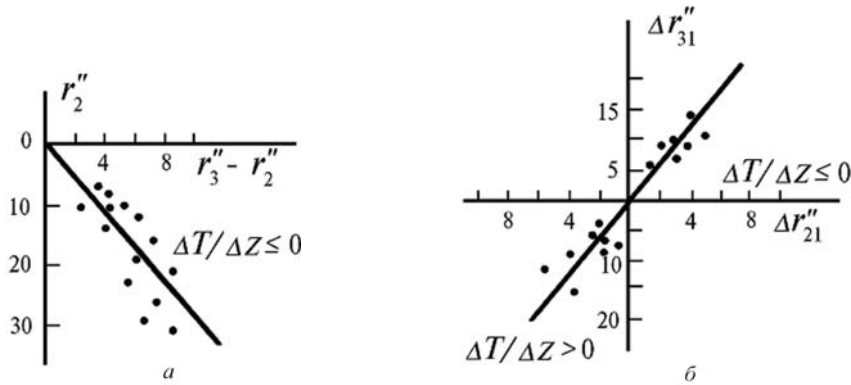


Рис. 2. Итоговые результаты эксперимента: а – зависимость угла рефракции от его приращения по высоте; б – зависимость приращений углов рефракции на разных высотах

Экспериментальный анализ вертикальной зависимости оптической рефракции проводился на основании наблюдений за тремя мишенями, расположенными в одном направлении на расстоянии $l_1 = l_2 = 2303$ м, $l_3 = 2415$ м и различающихся по высоте на величины $z_2 - z_1 = 2$ м, $z_3 - z_1 = 13$ м. В процессе наблюдений с помощью оптического теодолита 2Т2 было отмечено, что на плавные суточные изменения углов рефракции накладывались факторы, обусловленные неоднородностью трассы распространения светового луча. При этом величина разбросов Δr_{21} в среднем примерно вдвое превосходила аналогичную величину для Δr_{32} . Поэтому при проверке высотного соотношения (9) были выбраны вторая и третья мишени. Для них разбросы Δr_{32} составляли примерно 15% от углов рефракции. Итоговые результаты экспериментов показаны на рис. 2. Из рис. 2, а видно, что при $\Delta T / \Delta z \leq 0$ экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией (9): $r_2(t) \approx -3\Delta r_{32}(t)$ ($|\kappa_0| \ll |r_2|$). Вследствие неоднородности трассы и выбранного расположения мишеней с $L_1 \gg \Delta L_{31}$ проверка аналогичного условия (11) при $\Delta T / \Delta z > 0$ не привела к удовлетворительным результатам (в этом случае получалось $\kappa_{21}^s \gg 1$, $\kappa_{31}^s \gg 1$, и влияние разбросов измерений увеличивалось в десятки раз. В то же время приведенная на рис. 2, б зависимость Δr_{31} от Δr_{21} хорошо соответствовала теоретической (12): $\Delta r_{31}(t) \approx 3\Delta r_{21}(t)$ при всех стратификациях атмосферы.

Исследование случайной рефракции проводилось с помощью лазерного сканирующего теодолита [7] в дневное время в сентябре ($\Delta T / \Delta z < 0$) на трассе длиной 2415 м. Измеренная зависимость дисперсии случайных флуктуаций вертикального угла прихода, отраженного от уголкового отражателя лазерного луча (использовался гелий-неоновый лазер с $\lambda = 0,63$ мкм),

показана на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* приведены рассчитанная по формуле (19) и измеренная по формуле $r = \varphi - \varphi_0$ дневные зависимости угла вертикальной рефракции. Из него видно, что приведенные кривые $r(t)$ хорошо соответствуют друг другу, а значит, формула (19) при неустойчивой стратификации атмосферы может быть использована для оценки углов вертикальной рефракции, в том числе и на неоднородных трассах [8]. Кроме того, следует также отметить, что по известным значениям σ_r с помощью формул (21) нетрудно восстановить дневной ход параметров c_n и r_0 : $c_n \approx 8,6 \cdot 10^{-9} \sigma$ (см^{-1/3}), $r_0 \approx 4,75 [\sigma_r]^{-6/5}$ (см) (в нашем случае диаметр приемной апертуры D составлял 10 см).

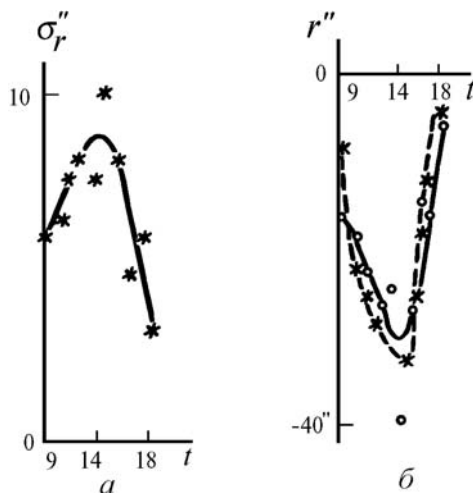


Рис. 3. Дневные зависимости: *а* – $\sigma_r(t)$, *б* – $r(t)$ (звездочки – рассчитанные по формуле (19) значения; точки – измеренные)

В заключение заметим, что проведенное исследование оптической рефракции на приземных трассах может оказаться полезным в задачах повышения точности угломерных и опорных оптических систем, работающих в условиях жаркого климата.

1. Куштин И. Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере. М.: Наука, 1981. 128 с.
2. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин И. Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.
3. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере /А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов, С.С. Хмелевцов. М.: Наука, 1976. 278 с.
4. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.
5. Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 290 с.
6. Зилитинкевич С. С., Чаликов Д. В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. № 3. С. 294–302.
7. Лежнев Н. Б., Дементьев В. Е., Сеидов А. и др. //Изв. АН ТССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук. 1988. № 5. С. 29–31.
8. Дементьев В. Е. //Изв. АН ТССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук. 1988. № 6. С. 38–43.
9. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
10. Цванг Л. Р. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1960. Т. 8. С. 1252–1262.
11. Fried D. L. //JOSA, 1965. V. 55. № 1. P. 1426–1433.
12. Новая геодезическая техника и ее применение в строительстве /Под ред. В.Е. Дементьева. М.: Высшая школа, 1982. 275 с.

Физико-технический институт АН Туркменистана

Поступила в редакцию
19 августа 1992 г.

A. Seidov, K.V. Shishakov. A Study of an Optical Refraction along Near Ground Paths in an Arid Zone.

Regular and random optical refraction along near ground paths under conditions of a hot climate in an arid zone is studied. Diurnal behavior of the vertical refraction angle, its dependence on the altitude of a target under observation, and relation of the regular component of the refraction angle behavior to the variance of its random fluctuations are the objects of this study. The formulas derived based on the Kolmogorov-Obukhov theory of the ground atmospheric layer and the theory of optical refraction enables one to essentially improve the accuracy of the refraction studies as compared to known technique of meteorological measurements of the refraction angle.