

## Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы.

### Часть 2. Рефракция лазерного луча

С.Л. Одинцов, В.А. Гладких, А.П. Камардин,  
В.П. Мамышев, И.В. Невзорова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.04.2017 г.

Приводятся результаты расчетов возможных смещений лазерных лучей под воздействием регулярной рефракции в пограничном слое атмосферы. Рассматривается случай размещения источника излучения на уровне подстилающей поверхности. Оценки смещений проведены для различных длин волн и различных углов входа луча в атмосферу. В расчетах использованы экспериментальные данные по показателю преломления оптических волн до высоты 1000 м, полученные на основе длительных измерений (1 год) высотных профилей температуры воздуха метеорологическим температурным профилимером МТР-5.

*Ключевые слова:* лазерное излучение, пограничный слой атмосферы, показатель преломления, рефракция; laser radiation, atmospheric boundary layer, refractive index, refraction.

#### Введение

В [1] были представлены результаты восстановления высотных профилей показателя преломления оптических волн в пограничном слое атмосферы (ПСА) на основе профилей температуры воздуха в диапазоне высот 0–1000 м. Наличие подобных экспериментальных данных позволяет оценить возможные отклонения лазерных лучей от прямолинейного пути распространения под воздействием регулярной рефракции. Полезность такого анализа обусловлена, в том числе перспективой уточнения моделей, используемых при решении задач о переносе лазерного излучения в атмосфере [2–4]. В частности, имеется возможность включить в модели рефракции суточный ход высотных профилей показателя преломления, особенно активно проявляющийся в ПСА, разработать модели рефракции для случаев многослойных инверсий температуры воздуха в холодный период года, оценить другие эффекты, связанные с «динамикой» высотно-временного распределения показателя преломления и его производных.

В представленном материале обсуждается возможное влияние регулярной рефракции на положение лазерного луча в ПСА при размещении источника

излучения на земной поверхности. Оценки сделаны для лазерного излучения с различными длинами волн  $\lambda$  (в диапазоне от 0,1 до 10 мкм) при различных углах входа в атмосферу. Конкретные параметры излучения (ширина и форма лазерного пучка, мощность излучения и т.п.) не рассматриваются. Предполагается выполнение законов геометрической оптики.

Напомним, что экспериментальные данные по профилям температуры воздуха в ПСА, на основе которых определялись профили показателя преломления, были получены с помощью метеорологического температурного профилера МТР-5 [5], входящего в состав комплекса приборов ЦКП ИОА СО РАН «Атмосфера». Измерения проводились в г. Томске (Академгородок). Представленные далее результаты основаны на измерениях с сентября 2015 по сентябрь 2016 г. Шаг измерения профилей температуры по высоте составлял 50 м, а по времени – 5 мин.

#### Аналитическая основа для определения регулярной рефракции лазерного луча

Распределение температуры (и показателя преломления  $n$ ) в пограничном слое атмосферы предполагалось плоскостойким и горизонтально однородным, а регулярная рефракция оценивалась в соответствии с законом Снеллиуса

\* Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kap136@iao.ru); Владимир Петрович Мамышев (mvp78@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru).

$$n(z) \sin \theta(z) = n(z_1) \sin \theta(z_1), \quad (1)$$

где  $z$  — вертикальная координата (начало координат расположено на земной поверхности, ось  $z$  направлена вверх);  $\theta$  — зенитный угол (угол от вертикальной оси до оси лазерного луча);  $z_1$  — вертикальная координата положения лазерного источника.

В дальнейшем полагаем, что источник лазерного излучения располагается в начале координат ( $z_1 = 0$ ). Зенитный угол лазерного луча на выходе из источника обозначим  $\theta_0$ . Горизонтальная координата  $x$  положения луча на высоте  $z$  вычислялась по формуле

$$x(z) = \sin \theta(z_1) \int_{z_0}^z \frac{dz}{\sqrt{\left[\frac{n(z)}{n(z_1)}\right]^2 - \sin^2 \theta(z_1)}}. \quad (2)$$

При постоянстве показателя преломления по высоте лазерный луч не будет отклоняться от прямолинейного пути («нейтральное» положение). Тогда горизонтальная координата луча на высоте  $z$  будет равна  $x_c(z) = z \operatorname{tg} \theta_0$ . Длина  $L_c$  (прямолинейной) трассы распространения до точки с координатами  $\{x_c, z\}$  составит  $L_c = z / \cos \theta_0$ .

Основная задача при выполнении работы заключалась в оценках величины смещения луча  $\Delta x(z) = x(z) - x_c(z)$  от своего «нейтрального» положения с учетом профилей  $n(z)$ , полученных на основе профилей температуры воздуха, измеренных профилюмером МТР-5.

Кроме того, была оценена «длина рефракции»  $L_R$  [2] с использованием второй производной показателя преломления  $\partial^2 n / \partial z^2$ :

$$L_R(z) = \frac{1}{\sqrt{|\partial^2 n / \partial z^2|}}. \quad (3)$$

Оценки  $\partial^2 n / \partial z^2$  на основе экспериментальных данных приводились в [1]. Полученные с помощью формулы (3) значения  $L_R(z)$  соответствуют случаю, когда лазерное излучение распространяется на высоте  $z$  в горизонтальном направлении и величина  $\partial^2 n / \partial z^2$  по трассе остается постоянной.

Отметим, что в приведенных выше формулах не отображается зависимость показателя преломления от длины волны  $\lambda$ . Однако она существует и может играть заметную роль при рефракции (и формировании смещений  $\Delta x$ ), особенно в ультрафиолетовой области спектра. Напомним формулу, по которой вычислялся показатель преломления:

$$n(z, \lambda) = 1 + 77,6(1 + 0,00752\lambda^{-2}) \cdot \frac{p(z)}{T(z)} \cdot 10^{-6}. \quad (4)$$

Здесь  $p$  — атмосферное давление, гПа;  $T$  — температура воздуха, К;  $\lambda$  — длина волны, мкм. Температура воздуха измерялась профилюмером МТР-5. Атмосферное давление определялось по барометрической формуле [1].

## Результаты оценок смещения лазерного луча в пограничном слое атмосферы

Все приведенные ниже оценки сделаны на основе экспериментальных данных, полученных с сентября 2015 по сентябрь 2016 г. Величины показателя преломления (точнее, его отклонения от 1) и его производные по высоте в различные сезоны года на разных высотах (в пределах 1000 м) приведены в [1]. Согласно этим данным, наибольшие изменения показателя преломления по высоте приходились на январь 2016 г. Поэтому рассмотрим более подробно оценки смещений  $\Delta x(z, \theta_0)$  именно для этого месяца.

На рис. 1 показаны величины  $\Delta x(z, \theta_0)$  на «предельной» высоте  $z = 1000$  м для нескольких углов  $\theta_0$  входа лазерного луча в атмосферу. При разных углах  $\theta_0$  поведение  $\Delta x$  однотипно. Это подтверждается сравнением кривых после их автономировки (данный вывод оставим без графической иллюстрации).

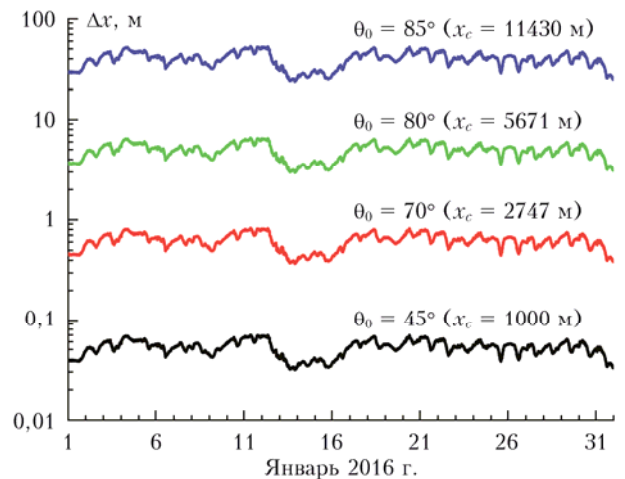


Рис. 1. Смещение луча от «нейтрального» положения на высоте 1000 м при разных углах  $\theta_0$  входа в атмосферу; вычисления проведены для длины волны  $\lambda = 10$  мкм

На более низких уровнях смещения  $\Delta x(z)$  будут меньше, чем те, которые представлены на рис. 1. В качестве примера на рис. 2 показаны графики  $\Delta x(z)$  для нескольких высот при  $\theta_0 = 80^\circ$  и  $\lambda = 10$  мкм. На нижнем уровне (50 м) смещение составляет 0,01–0,03 м, в то время как на верхнем уровне (1000 м) смещение меняется примерно от 3 до 7 м. В соответствии с рисунком поведение  $\Delta x(z)$  на разных высотах в целом повторяется, но полного совпадения формы кривых нет.

Зависимость смещения луча от длины волны демонстрирует рис. 3, на котором показано поведение  $\Delta x$  на высоте 1000 м при  $\theta_0 = 85^\circ$  и «нормальных» длинах волн  $\lambda = 0,3$  и 10 мкм, а также «экзотический» случай  $\lambda = 0,1$  мкм («средняя» часть ультрафиолетовой области спектра). Очевидно, что в диапазоне длин волн, обычно используемых в задачах

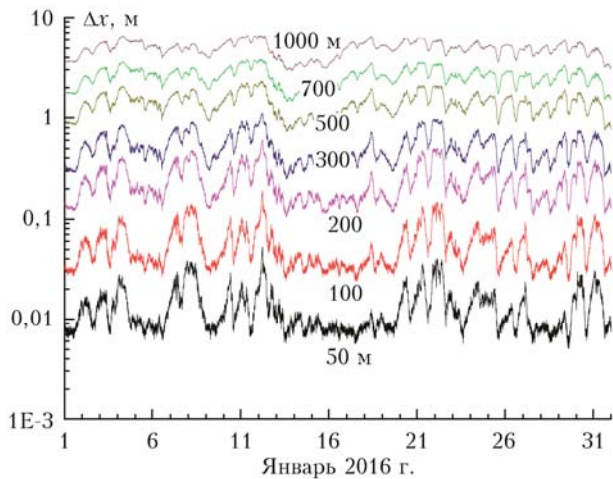


Рис. 2. Зависимость смещения луча от высоты (указана около графиков) при угле входа в атмосферу  $\theta_0 = 80^\circ$ ; вычисления проведены для  $\lambda = 10$  мкм

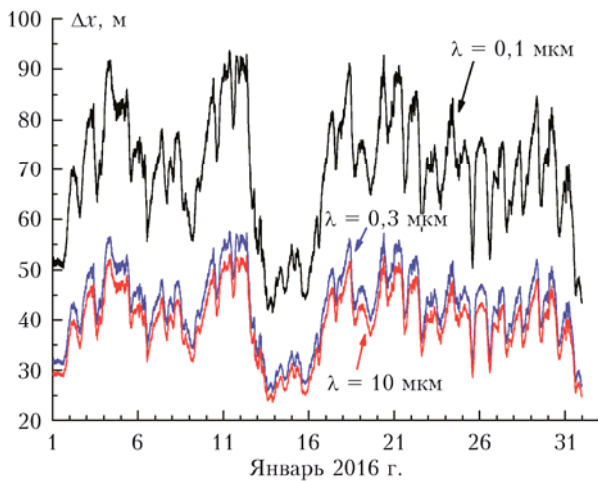


Рис. 3. Зависимость смещения луча от длины оптической волны на высоте 1000 м при угле  $\theta_0 = 85^\circ$

оптики атмосферы (видимая и инфракрасная области спектра), смещения луча относительно слабо зависят от длины волны. Но в ультрафиолетовой области смещения существенно увеличиваются. Это является следствием квадратичной зависимости показателя преломления от длины волны согласно формуле (4).

В соответствии с выражением (2) подынтегральная функция в случае  $n(z) < n_0 \sin \theta_0$  становится комплексной. Фактически это означает, что при угле выхода луча из источника  $\theta_0 = \theta_{0,p}$  на высоте  $z$  происходит «поворот» луча, т.е. после точки «поворота» луч будет направлен к поверхности. Поскольку  $n(z)$  и  $n_0$  нам известны из измерений, то для заданной высоты  $z$  можно определить угол  $\theta_{0,p}(z)$ , при котором на данной высоте произойдет «поворот» луча. Координата точки «поворота» в горизонтальной плоскости  $x_p(z, \theta_{0,p})$  определяется по формуле  $x_p(z, \theta_{0,p}) = z / \operatorname{tg} \theta_{0,p}$ .

На рис. 4 приведены графики  $\theta_{0,p}(z)$  и  $x_p(z)$  для нескольких высот, полученные на основе изме-

рений в январе 2016 г. Вычисления проведены для  $\lambda = 10$  мкм. Без дополнительных иллюстраций отметим, что в другие периоды измерений, когда градиенты температуры в нижней части пограничного слоя атмосферы были не такими большими (по модулю) как в январе 2016 г., величины углов  $\theta_{0,p}(z)$  на одних и тех же высотах  $z$  смещаются ближе к  $90^\circ$ , а горизонтальные координаты  $x_p(z)$  «точки поворота» луча становятся несколько больше тех, которые приведены на рис. 4, б.

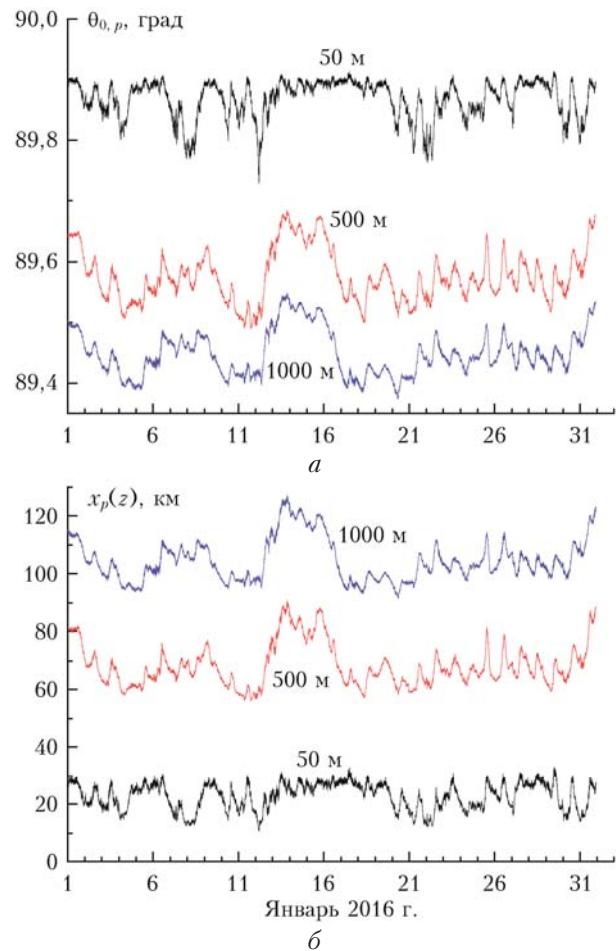


Рис. 4. Оценки углов выхода луча (а) и дальностей в горизонтальной плоскости (б), соответствующих точкам «поворота» луча на заданной высоте

Результаты вычисления «длины рефракции»  $L_R$  по формуле (3) за весь период анализа (сентябрь 2015 – сентябрь 2016 г.) при длине оптической волны 10 мкм для трех высот показаны на рис. 5. Каждая точка соответствует профилю показателя преломления, измеренному за 5-минутный интервал времени. Представлен только ограниченный диапазон значений  $L_R$ . Подчеркнем, что при отображении полученных результатов значениям  $L_R$  был присвоен знак второй производной  $\partial^2 n / \partial z^2$  (в выражении (3) фигурирует абсолютное значение этой производной). Знак  $L_R$  определяет или фокусировку ( $L_R < 0$ ), или дефокусировку ( $L_R > 0$ ) лазерного пучка [2]. Не проводя детальный статистический анализ, укажем

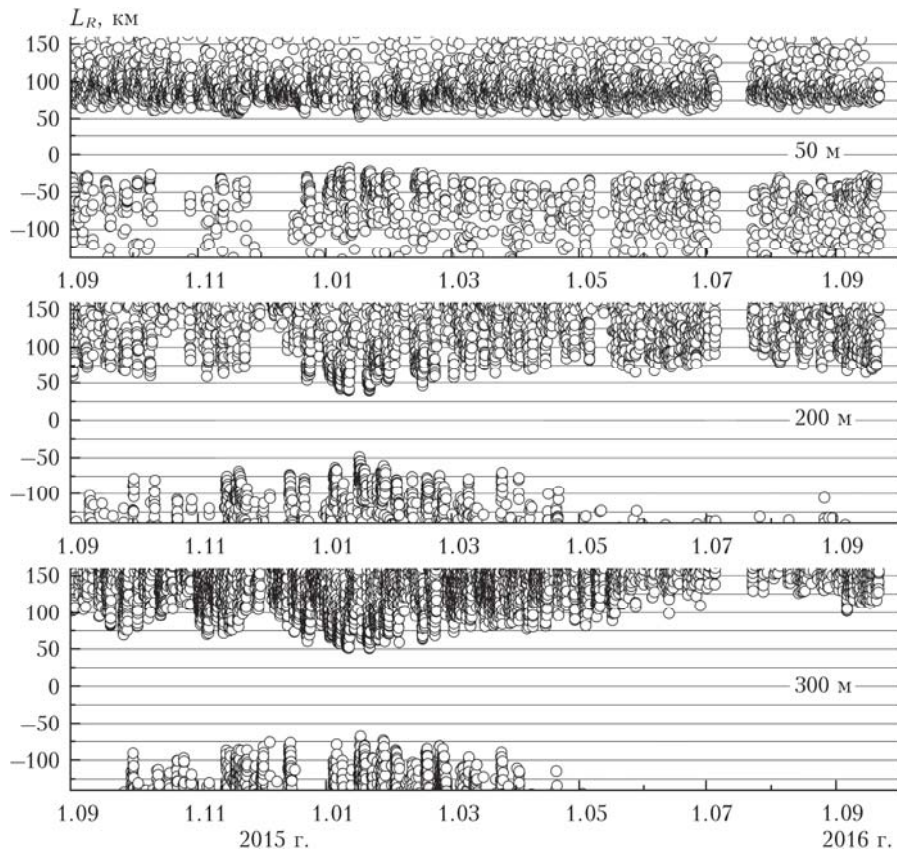


Рис. 5. «Длина рефракции»  $L_R(z)$  для нескольких высот

лишь, что на высоте  $z = 50$  м в отрицательной области значений  $L_R$  имело место неравенство  $L_R < -17$  км. При этом условие  $-50 \leq L_R < -17$  км реализовывалось для этой высоты  $\sim 9000$  раз (число 5-минутных интервалов измерений), а условие  $-21 \leq L_R < -17$  км только 30 раз.

Завершая краткое изложение результатов анализа смещения лазерного луча от своего «нейтрального» положения, приведем графики  $\Delta x(z)$  за весь

период наблюдений (сентябрь 2015 — сентябрь 2016 г.) для высот 500 и 1000 м при  $\theta_0 = 85^\circ$  и длине волны  $\lambda = 10$  мкм (рис. 6, а). Для других высот, углов и длин волн изменение величины  $\Delta x$  можно оценить в соответствии с теми закономерностями, которые представлены на рис. 1–3. Отметим только, что в летнее время имеет место хорошо выраженный суточный ход величины  $\Delta x$ , что продемонстрировано на рис. 6, б. В зимнее время он тоже

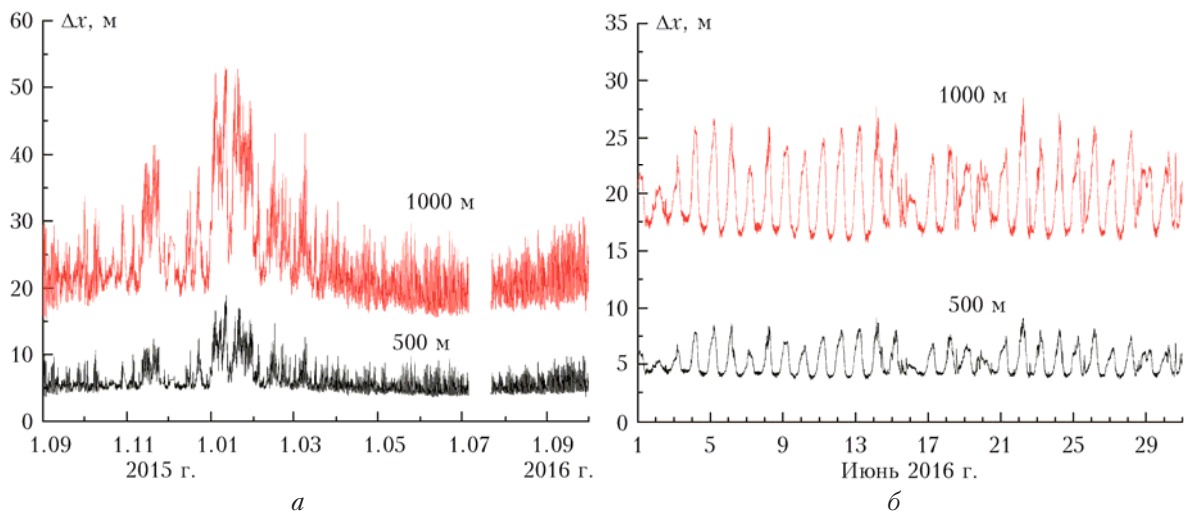


Рис. 6. Смещение луча от «нейтрального» положения на высотах 500 и 1000 м при  $\theta_0 = 85^\circ$  и  $\lambda = 10$  мкм за весь период наблюдений (а) и только в июне 2016 г. (б)

просматривается (см., например, рис. 3), но не так явно. Понятно, что суточный ход  $\Delta x$  определяется суточной динамикой показателя преломления  $n(z)$ , примеры которой приводились в [1].

С использованием оценок  $\Delta x$  можно вычислить величину возможного «промаха» лазерного луча, т.е. расстояние  $\Delta R$  между приемником сигнала, расположенным в точке с координатами  $\{z, x_c(z, \theta_0)\}$ , и прошедшим мимо него лучом, нацеленным на приемник под зенитным углом  $\theta_0$ . Для этого можно использовать приближенную формулу  $\Delta R \approx \Delta x \cdot \cos\theta_0$ . В частности, для случаев, представленных на рис. 6,  $a$  (длина волны  $\lambda = 10$  мкм), величины  $\Delta R$  показаны на рис. 7. Для более коротких длин волн эти «промахи» будут несколько больше.

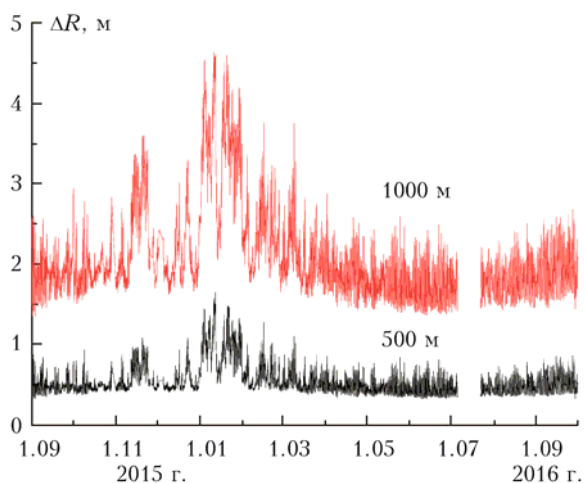


Рис. 7. Отклонение луча от приемника, расположенного на высоте 500 или 1000 м, при  $\theta_0 = 85^\circ$  и  $\lambda = 10$  мкм

### Заключение

Следует еще раз напомнить, что при оценках использовались результаты работы температурного профилера МТР-5, обладающего определенным сглаживающим эффектом. Поэтому нельзя исключать того, что в некоторых случаях могла произойти «недооценка» величин  $\Delta x$  (и  $\Delta R$ ). «Переоценки» значений  $\Delta x$  в приведенном материале быть не может.

Кроме того, при всех вычислениях полагалось, что профили температуры воздуха во всем ПСА, где распространяется лазерный луч, должны быть идентичны измеренным профилям над пунктом размещения МТР-5. Реальное же распределение поля (средней) температуры воздуха по трассе лазерного

луча может заметно отличаться от того, которое в текущий момент измеряется прибором МТР-5 над пунктом наблюдения. Поэтому все представленные выше количественные результаты носят оценочный характер. Тем не менее выявленные закономерности и порядки изменчивости величин могут служить основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, так как в целом достоверно отражают пространственно-временное распределение показателя преломления оптических волн в атмосферном пограничном слое как в суточном, так и в годовом цикле.

1. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В., Федоров В.А.* Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 10. С. 821–828.
2. *Колосов В.В., Дудоров В.В., Филимонов Г.А., Панина А.С., Воронцов М.А.* Учет влияния крупномасштабных атмосферных неоднородностей в задаче распространения лазерного излучения на протяженных высотных трассах // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1034–1040; *Kolosov V.V., Dudorov V.V., Filimonov G.A., Panina A.S., Vorontsov M.A.* Accounting for the effect of large-scale atmospheric inhomogeneities in problems of laser radiation propagation along long high-altitude paths // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 123–129.
3. *Асанов С.В., Белов В.В., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Дудоров В.В., Землянов А.А., Игнатьев А.Б., Канев Ф.Ю., Колосов В.В., Коняев П.А., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Морозов В.В., Носов В.В., Пономарев Ю.Н., Пташник И.В., Тарасенков М.В.* Оптическая модель земной атмосферы для интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего ИК спектральных диапазонов // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 4. С. 338–345.
4. *Асанов С.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Игнатьев А.Б., Матвиенко Г.Г., Морозов В.В., Тарасенкова А.В.* Прогноз распространения интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего ИК спектральных диапазонов при работе на наклонных высотных атмосферных трассах // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 3. С. 167–176; *Asanov S.V., Geyntz Yu.E., Zemlyanov A.A., Ignatyev A.B., Matvienko G.G., Morozov V.V., Tarasenkova A.V.* Forecast of intense near- and mid-IR laser radiation propagation along slant atmospheric paths // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 4. P. 315–323.
5. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профилерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.

*S.L. Odintsov, V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, V.P. Mamyshev, I.V. Nevzorova. Estimates of the refractive index and regular refraction of optical waves in the atmospheric boundary layer. Part 2. Refraction of laser beams.*

Possible displacements of laser beams under the effect of regular refraction in the atmospheric boundary layer are calculated. The case of a radiation source installed at the surface level is considered. Displacements are estimated for different wavelengths and angles of the beam entrance into the atmosphere. The calculations are based on experimental data on the refractive index of optical waves up to an altitude of 1000 m received in long-term (one year) measurements of the vertical profiles of air temperature with a MTP-5 meteorological temperature profiler.