

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.325+535.321.9

Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы. Часть 2. Уширение лазерного пучка при сильной регулярной рефракции

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 29.03.2018 г.

На основе результатов измерения профилей температуры воздуха в пограничном слое атмосферы рассчитаны возможные отклонения лазерного пучка от точки размещения приемника при наклонных трассах распространения. Рассмотрен возможный сезонный и суточный ход отклонений под влиянием регулярной рефракции. Выделены и проанализированы случаи одновременно сильной (регулярной) рефракции лазерного пучка и его значительного уширения из-за влияния турбулентности.

Ключевые слова: атмосфера, зондирование, лазерное излучение, показатель преломления, рефракция, содар, турбулентность, уширение лазерного пучка; *atmosphere, sounding, laser radiation, refractive index, refraction, sodar, turbulence, laser beam broadening.*

Введение

В первой части работы [1] были приведены оценки радиуса когерентности и степени уширения лазерных пучков под воздействием турбулентности. Для оценок использовалась методика восстановления (вычисления) высотно-временных профилей структурной характеристики показателя преломления C_n^2 на основе результатов дистанционного акустического зондирования атмосферного пограничного слоя (АПС) с помощью содара ИОА СО РАН «Волна-4М» [2].

Интерес представляет изучение ситуаций, когда одновременно могут происходить сильная регулярная рефракция лазерного пучка и его заметное уширение под воздействием турбулентности. Как правило, для анализа характеристик распространяющихся лазерных пучков используются модельные представления параметров атмосферы или экспериментальные данные не очень большой продолжительности (см., например, [3, 4]). При этом далеко не всегда используемые модели способны обеспечить достоверность получаемых оценок рефракции и уширения лазерного пучка. Реальные (те-

кущие) условия могут значительно отличаться от модельных. В этой связи актуальной является задача формирования достаточно обширной базы экспериментальных данных о параметрах атмосферы, приводящих к регулярной рефракции и «турбулентному» уширению лазерного пучка. В Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН к настоящему времени уже накоплен определенный экспериментальный материал, позволяющий рассматривать комплексное решение задачи о возможных рефракции и уширении лазерного пучка.

В статьях [5, 6] представлены методика и результаты оценок возможной рефракции с использованием измеренных профилей температуры воздуха в 2015–2016 гг. в АПС над пунктом наблюдения «Томск» (г. Томск, Академгородок) с помощью метеорологического температурного профилемера МТР-5 [7–9]. Напомним, что профили температуры воздуха получались в диапазоне высот 0–1000 м с шагом по высоте 50 м и по времени 5 мин. Было показано, что наибольшие отклонения лазерного пучка от прямолинейного пути распространения могли происходить в холодный период года [6]. Согласно результатам первой части работы [1] повышенные (среднемесячные) значения параметра R_t — добавки к эффективному радиусу лазерного пучка за счет турбулентности — также приходится на зимние месяцы.

Прежде чем перейти к анализу случаев одновременно сильной рефракции и значительного

* Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kar136@iao.ru); Владимир Петрович Мамышев (mvp78@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru).

уширения лазерного пучка, коротко рассмотрим сезонные изменения возможной регулярной рефракции, дополнив результаты 2015–2016 гг., опубликованные в [6], измерениями 2017–2018 гг.

Влияние рефракции будем характеризовать величиной ΔR (м) – отклонением («промахом») лазерного луча от приемника, расположенного на высоте z . Условная схема возможного эксперимента представлена на рис. 1.

Полагаем, что $0 < z \leq 1000$ м, поскольку измерения температуры воздуха проводились только в пределах данного слоя. Далее рассматриваются результаты, соответствующие зенитному углу излучения $\theta = 85^\circ$. При таком значении θ величины ΔR становятся максимальными. Уменьшение θ приводит к уменьшению ΔR ($\Delta R = 0$ при $\theta = 0^\circ$). Варианты

с углами $\theta > 85^\circ$ не рассматриваются (основной анализ проводится для наклонных трасс). Стратификация атмосферы полагается плоскостной (без учета кривизны земной поверхности), т.е. температура воздуха на каком-либо уровне $z \leq 1000$ м, зарегистрированная в текущий момент времени над точкой наблюдения, будет такой же на данном уровне при любом удалении от нее. Такое предположение вполне допустимо, поскольку рассматриваемые длины трасс лазерного пучка $L \leq 11,5$ км.

С использованием методики, изложенной в [6], были проведены вычисления ΔR за период с января 2015 г. по февраль 2018 г. при круглосуточном измерении профилей температуры воздуха (за исключением периодов ремонта прибора МТП-5). Результаты вычислений приведены на рис. 2.

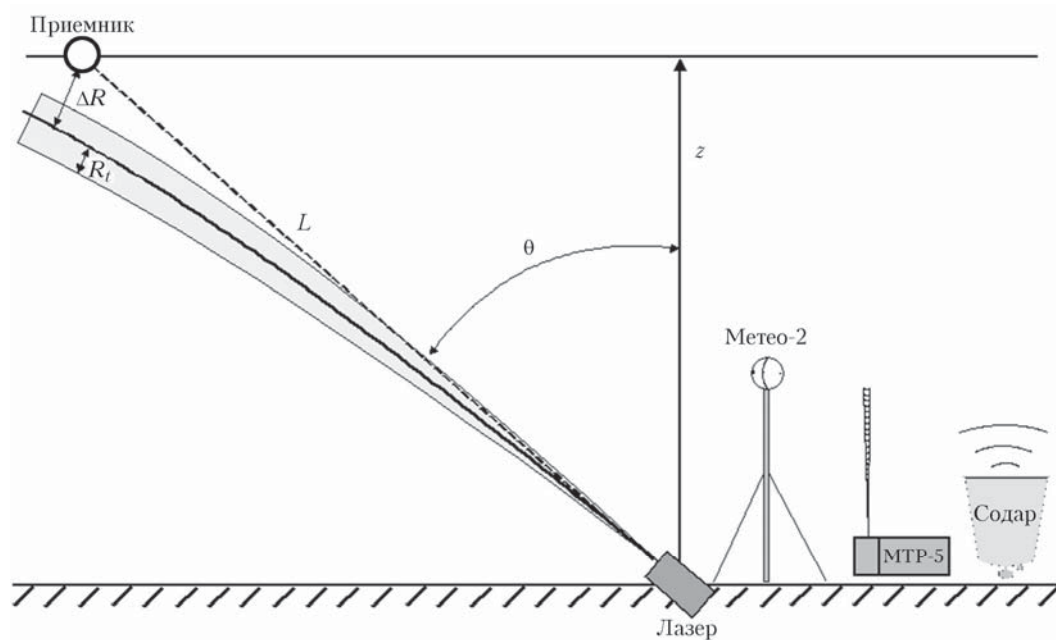


Рис. 1. Условная схема возможного эксперимента

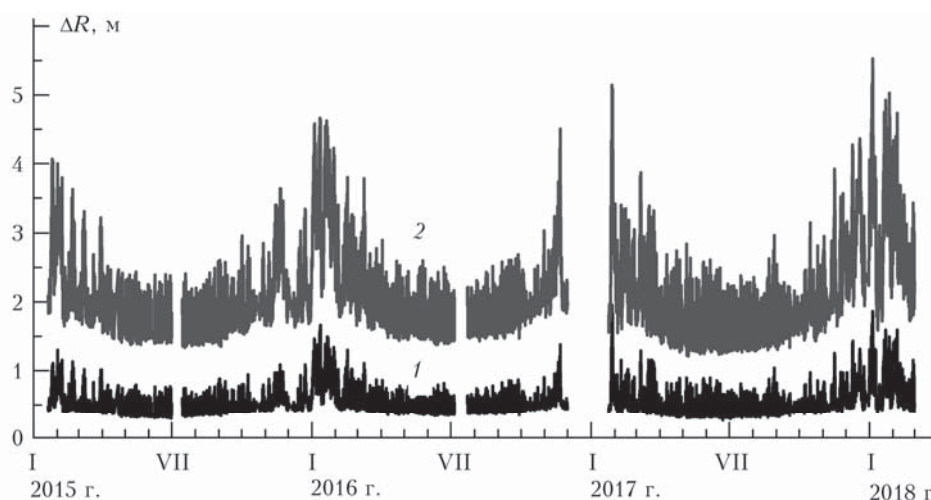


Рис. 2. Значения возможных «промахов» лазерного пучка: 1 – $z = 500$ м; 2 – $z = 1000$ м; $\lambda = 1$ мкм; $\theta = 85^\circ$; $L \approx 11,5$ км

Согласно рис. 2 имеет место хорошо выраженный сезонный ход «промахов» ΔR . Причем в зимнее время величины ΔR существенно больше, чем в летнее. Причиной этого являются сильные зимние инверсии температуры воздуха в АПС над пунктом наблюдения «Томск», которые могут привести к большим градиентам показателя преломления и, следовательно, к сильной рефракции на наклонных трассах.

Наряду с возможным сезонным ходом ΔR имеет место и суточный ход данной величины. Ранее мы уже отмечали этот факт [6]. Теперь имеется возможность сопоставить ход ΔR за несколько лет наблюдений в отдельные месяцы. Рассмотрим два случая: февраль и август. На рис. 3 показаны графики значений ΔR , вычисленных для варианта $\lambda = 1$ мкм, $\theta = 85^\circ$ при $z = 1000$ м (февраль) и $z = 500$ м (август). Используются результаты измерений профилей температуры воздуха в 2015–2018 гг. Разные высоты взяты для того, чтобы более акцентированно отобразить на одном рисунке закономерности суточного хода ΔR в холодное и теплое время года. Диапазон изменения ΔR в августе на высоте $z = 1000$ м можно оценить с использованием рис. 2. При этом закономерности суточного хода для этого месяца на высоте 1000 м будут практически полностью повторять закономерности на высоте 500 м.

Согласно рис. 3 в холодное время года явно выраженного суточного хода «промахов» ΔR нет. Тем не менее на отдельных интервалах времени

периодичность изменения ΔR имеется. В то же время результаты для летнего месяца демонстрируют совершенно четкий суточный ход. При этом амплитуды «колебаний» ΔR в разные годы, но в одни и те же дни месяца (августа) очень близки, за исключением нескольких эпизодов. Отметим без иллюстраций, что и в другие месяцы теплого времени года поведение ΔR аналогично. Понятно, что высокая степень повторяемости вариаций ΔR в теплые сезоны разных лет связана с суточной периодичностью температурной стратификации в АПС. Более подробно статистика температурной стратификации в пункте наблюдения «Томск» в различные сезоны года обсуждалась в работах [10, 11].

Теперь рассмотрим случаи, когда имеет место сильное «турбулентное» уширение лазерного пучка в условиях повышенной регулярной рефракции. В анализ были включены результаты совместной (одновременной) работы температурного профилера МТР-5, содара «Волна-4М» и ультразвуковой метеостанции «Метео-2» в период с сентября 2015 г. по февраль 2018 г. включительно. За этот период было несколько перерывов в работе отдельных приборов, связанных с их ремонтом и калибровкой. В итоге обработаны 6872 ч наблюдений (с учетом того, что содар работал с 08:00 до 21:00 по местному времени).

Будем полагать, что большие «промахи» отвечают значениям ΔR , превышающим уровень 75% интегральной функции распределения данной величины. Для указанного периода измерений и варианта

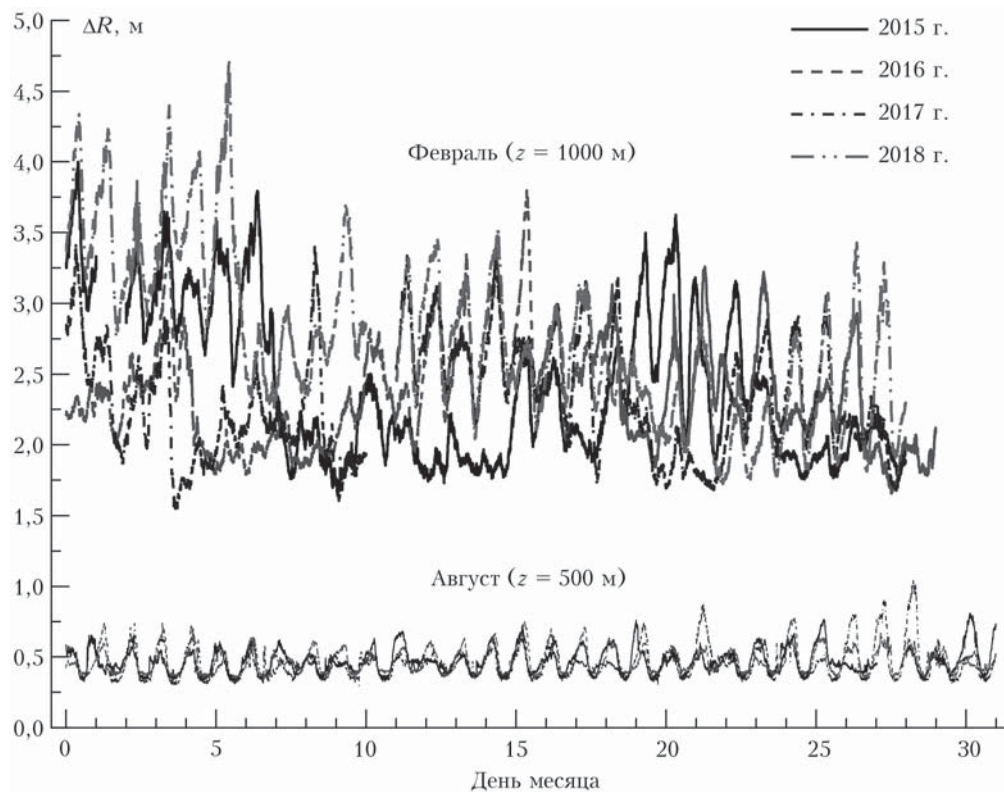


Рис. 3. Значения возможных «промахов» лазерного пучка в сопоставимое время разных лет наблюдений; $\lambda = 1$ мкм; $\theta = 85^\circ$

$\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ большие «промахи» соответствовали условию $\Delta R \geq 2,26$ м и имели место в основном в холодный период года.

Под сильным уширением лазерного пучка будем подразумевать случаи, когда значения параметра R_t превышают уровень 75% интегральной функции распределения данной величины. Используя результаты, изложенные в [1], можно сделать вывод, что для рассматриваемого периода измерений и варианта $\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ уширение становится сильным при $R_t \geq 0,16$ м. Примеры типичного поведения R_t и некоторая статистика данного параметра в зимнее и летнее время были приведены в [1].

В результате установлено, что одновременное выполнение условий $\Delta R \geq 2,26$ м и $R_t \geq 0,16$ м (для варианта $\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$) имело место примерно в 15% от общего времени наблюдений (1004 из 6872 ч). При этом практически все выделенные события (около 96% случаев) реализовывались в холодный период года (ноябрь – март). Частота реализации этих событий по времени суток представлена в таблице. Можно предположить, что если бы содар в пункте наблюдения «Томск» работал круглосуточно, то статистика как величины R_t , так и сочетания больших «промахов» и значительного уширения пучка несколько бы изменилась.

Зависимость частоты реализации одновременно больших «промахов» и сильного «турбулентного» уширения лазерного пучка от времени суток

Временной интервал, ч	Частота реализации событий, %
08:00–09:00	8,9
09:00–10:00	10,3
10:00–11:00	10,7
11:00–12:00	10,6
12:00–13:00	9,3
13:00–14:00	7,8
14:00–15:00	6,9
15:00–16:00	5,8
16:00–17:00	5,6
17:00–18:00	5,6
18:00–19:00	5,9
19:00–20:00	6,1
20:00–21:00	6,4

В первой части работы [1] мы уже отмечали, что повышенные значения R_t в зимнее время могут иметь место не только в пункте наблюдения «Томск». Высотно-временное распределение C_n^2 в нижнем слое атмосферы, способное привести к более высоким значениям R_t в зимнее время, по сравнению с летним, продемонстрировано, например, в [12], где представлены продолжительные измерения C_n^2 на северо-западе Германии (в сельской местности).

Немаловажным является вопрос о возможных взаимосвязях «промахов» ΔR и «турбулентного» уширения R_t . Понятно, что исследование этих взаимосвязей составляет отдельную задачу и будет

сводиться в итоге к изучению зависимости интенсивности температурной турбулентности от текущей стратификации атмосферы. Однако составить общее представление о них можно с помощью рис. 4, на котором символами показаны «пары» R_t и ΔR в совпадающие моменты времени для варианта $\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ в зимнее (рис. 4, а, б) и летнее (рис. 4, в, г) время разных лет наблюдений. Для построения этих рисунков использовался весь набор вычисленных значений R_t и ΔR , а не только варианты с большими «промахами» и со значительным уширением лазерного пучка. Каждый символ на этих графиках соответствует оценкам за 5-минутный интервал времени. Отметим, что структура «облаков» экспериментальных данных, представленных на рис. 4, достаточно типична и для других месяцев измерений, относящихся к холодному или теплому периоду года.

Результаты для зимних периодов представляют особый интерес. Принято считать, что увеличение устойчивости пограничного слоя атмосферы приводит к подавлению турбулентных пульсаций как скорости ветра, так и температуры воздуха. Поэтому должно было бы выполняться правило, что с увеличением ΔR (фактически – увеличение устойчивости) значения параметра R_t будут уменьшаться. Однако рис. 4, а, б демонстрирует обратную зависимость. Это связано с фактом, что в нижних слоях атмосферы даже при сильно устойчивой стратификации (мощных инверсиях температуры воздуха) могут присутствовать области с большой интенсивностью температурных пульсаций.

В качестве примера подобной ситуации рассмотрим измерения 5.01.2018 г. (08:00–20:00), когда оценки возможных значений ΔR и R_t для варианта $\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ достигали экстремальных величин ($\Delta R \approx 4,4$ – $5,4$ м; $R_t \approx 0,5$ – $1,1$ м).

На рис. 5, а приведена исходная эхограмма содара, служившая основой для определения высотно-временного распределения значений R_t . На рис. 5, б показаны высотные профили температуры воздуха с шагом по времени 30 мин за период работы содара (без указания времени измерения отдельных профилей). На рис. 5, в представлены оценки R_t и ΔR за период измерений. На рис. 5, г приведено высотно-временное распределение структурной характеристики C_n^2 , рассчитанной на основе результатов работы содара по методике, изложенной в работах [1, 13].

Градиенты температуры достигали в нижнем слое атмосферы $0,078$ °С/м, что привело к сильной рефракции и большим значениям ΔR . При этом в диапазоне высот до 100–150 м имела место область с высокими значениями C_n^2 , особенно вблизи подстилающей поверхности. Заметим, что именно нижний слой определяет существенное уширение лазерного пучка. В этой ситуации наиболее вероятной причиной возникновения интенсивной температурной турбулентности мог быть ветер. В рассматриваемом эпизоде его скорость на уровне 5 м (высота размещения «Метео-2» над крышей здания)

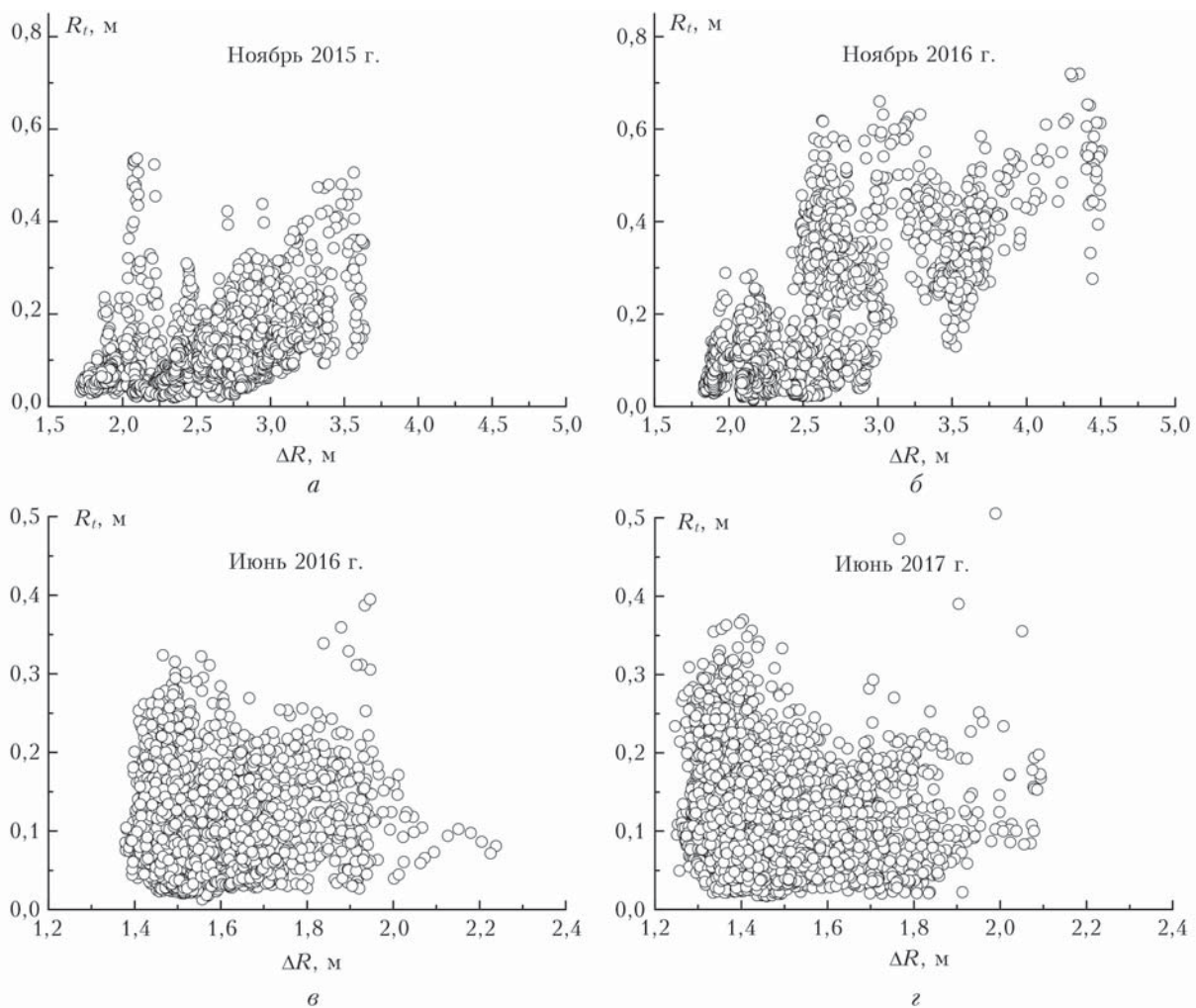


Рис. 4. Взаимосвязь «промахов» и «турбулентного» уширения в зимнее (а, б) и летнее (в, з) время разных лет наблюдений для варианта $\lambda = 1$ мкм, $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$

составляла порядка 1–2 м/с, а на высоте 100 м изменялась в течение дня от 5 до 10 м/с (по измерениям содара). Это привело к достаточно большим сдвиговым напряжениям и, как следствие, к генерации турбулентных пульсаций температуры воздуха при ее больших вертикальных градиентах.

Все приведенные выше оценки были получены для длины оптической волны $\lambda = 1$ мкм. Эти оценки практически не изменятся, если длина волны будет больше [6, 13]. Но с уменьшением λ , особенно при переходе в ультрафиолетовую область спектра, изменяются как «промахи» ΔR , так и уширение R_t . Без подробного анализа приведем лишь один пример изменения параметров ΔR и R_t для нескольких длин волн. На рис. 6 показаны графики этих параметров, вычисленные по результатам измерений 5.01.2018 г. при $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ (протяженность трассы $L \approx 11,5$ км) и длинах волн 0,1, 0,2, 0,4 и 1 мкм. Понятно, что варианты $\lambda = 0,1$ и 0,2 мкм являются достаточно «экзотическими» для трасс такой длины, но они позволяют оценить, в каком диапазоне могут находиться зна-

чения ΔR и R_t в экстремальных условиях, к которым относятся измерения 5.01.2018 г. Отметим, что для рассматриваемых длин волн структура поля C_n^2 , приведенная на рис. 5, з, несколько изменится. При этом значения C_n^2 будут существенно больше, что значительно увеличивает R_t по сравнению со случаем более длинных волн. Это и демонстрирует рис. 6, б.

Изложенные выше результаты относятся к случаю размещения приемника на высоте $z = 1000$ м под зенитным углом $\theta = 85^\circ$ по отношению к источнику лазерного излучения. Понятно, что уменьшение θ и/или z приведет к уменьшению значений ΔR и R_t . Однако это уменьшение будет связано не только с фактом «простого» укорочения длины трассы распространения излучения $L \approx z \sec \theta$, но и с особенностями высотных профилей показателя преломления и его структурной характеристики C_n^2 в пограничном слое атмосферы. Анализ вкладов различных областей атмосферы в формирование величин ΔR и R_t представляет отдельную задачу и здесь не проводится.

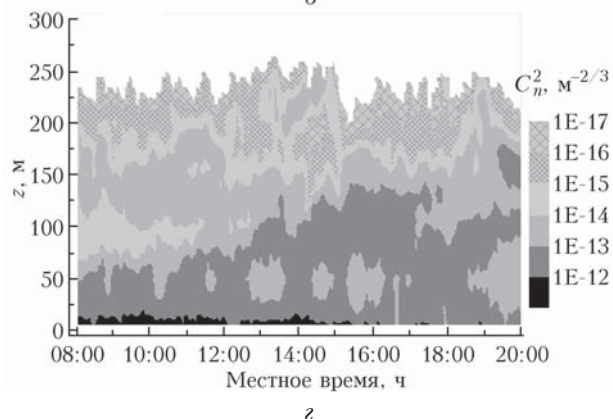
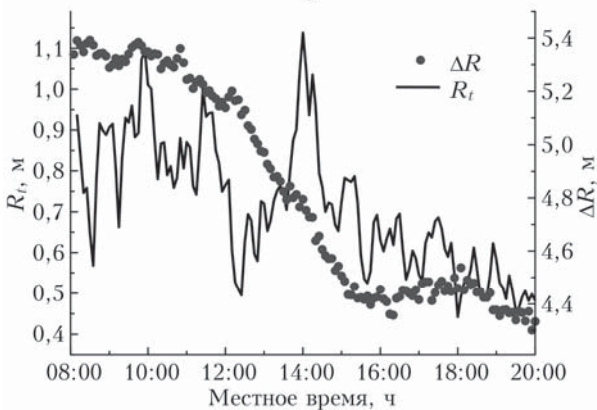
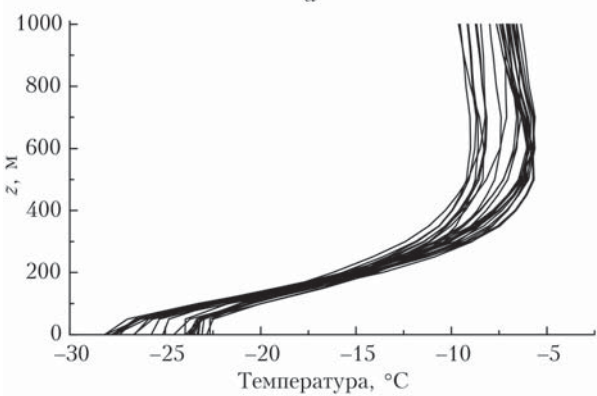
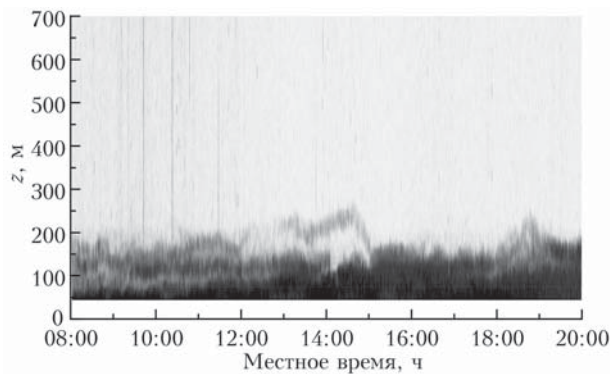


Рис. 5. Эхограмма содара «Волна-4М» (а), профили температуры воздуха (МТР-5) (б), «промахи» ΔR и «турбулентное» уширение R_t лазерного пучка (в) и структура поля C_n^2 во время измерений, проводившихся 5.01.18 (Томск)

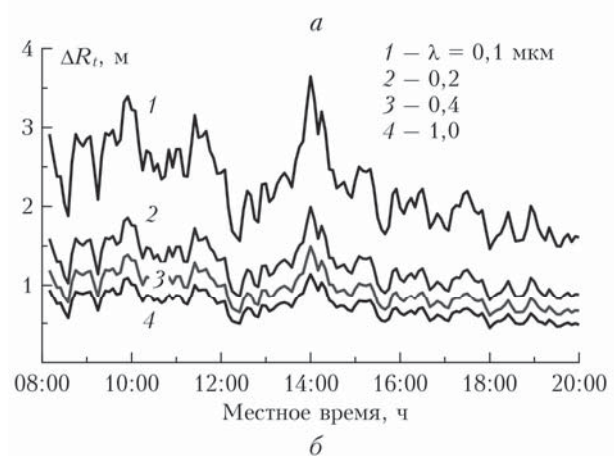
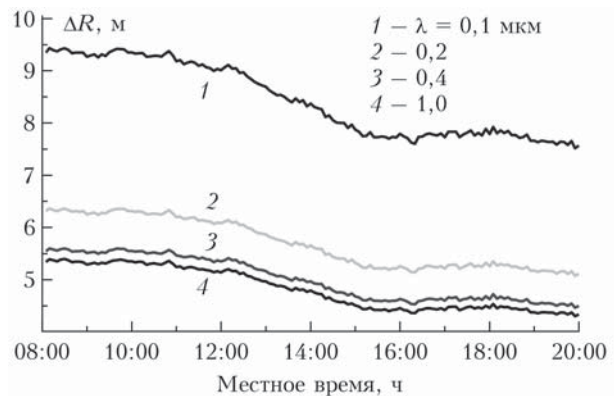


Рис. 6. Оценки «промахов» ΔR (а) и «турбулентного» уширения R_t (б), рассчитанные по измерениям 5.01.2018 г. для приемника с координатами $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$ при разных длинах волн лазерного излучения

Считаем необходимым отметить, что представленные в статье материалы можно характеризовать только как предварительные. Существует еще ряд вопросов как по методике восстановления высотновременных профилей показателя преломления в пограничном слое атмосферы, основанной на результатах работы метеорологического температурного профилимера МТР-5, так и по методике расчета структурной характеристики показателя преломления C_n^2 с использованием результатов работы содара «Волна-4М». Тем не менее полученные на основе экспериментальных данных оценки в целом согласуются с литературными данными и физически не противоречат возможным изменениям характеристик лазерных пучков под влиянием регулярной рефракции и турбулентности.

Оборудование, использовавшееся для проведения измерений, входит в состав ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

1. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В., Фёдоров В.А. Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Радиус когерентности и турбулентное уширение лазерного пучка // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 698–705.

2. Камардин А.П., Гладких В.А., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Метеорологический акустический доплеровский локатор (содар) «ВОЛНА-4М-СТ» // Приборы. 2017. Т. 202, № 4. С. 37–44.
3. Kulikov V.A., Vorontsov M.A. Analysis of the joint impact of atmospheric turbulence and refractivity on laser beam propagation // Opt. Express. 2017. V. 25, N 23. P. 28524–28535.
4. He P., Nunalee C.G., Basu S., Minet J., Vorontsov M.A., Fiorino S.T. Influence of heterogeneous refractivity on optical wave propagation in coastal environments // Meteorol. Atmos. Phys. 2015. V. 127, N 6. P. 685–699.
5. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В. Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 821–828.
6. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В. Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 2. Рефракция лазерного луча // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 829–833.
7. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
8. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
9. Rotach M.W., Calanca P., Graziani G., Gurtz J., Stein D., Vogt R., Andretta M., Christen A., Cieslik S., Connolly R., De Wekker S., Galmarini S., Kadygrov E.N., Kadygrov V.N., Miller E.A., Neisinger B., Rucker M., Van Gorsel E., Weber H., Weiss A., Zappa M. Turbulence structure and exchange processes in an alpine valley: The Riviera Project // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2004. V. 85, N 9. P. 1367–1385.
10. Невзорова И.В., Камардин А.П., Одинцов С.Л. Статистика градиентов потенциальной температуры в пограничном слое атмосферы // Аэрозоли Сибири. XXIII Рабочая группа: Тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 58.
11. Камардин А.П., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика градиентов температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском по измерениям температурным профиломером МТП-5 // Аэрозоли Сибири. XIX Рабочая группа: Тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. 39.
12. Sprung D., Grossmann P., Sucher E. Investigation of seasonal and diurnal cycles on the height dependence of optical turbulence in the lower atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2012. V. 8517. P. 85170K-1-12.
13. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Использование результатов акустической диагностики пограничного слоя атмосферы для оценки влияния турбулентности на характеристики лазерного пучка // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1008–1016.

S.L. Odintsov, V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, V.P. Mamyshv, I.V. Nevzorova. Assessment of the influence of turbulence and regular refraction on laser beam characteristics in the atmospheric boundary layer. Part 2. Laser beam broadening at strong regular refraction.

Possible deviations of a laser beam from the detector in the case of slant propagation paths are calculated with the use of measured profiles of air temperature in the atmospheric boundary layer. The possible seasonal and diurnal dynamics of the deviations under the effect of regular refraction is considered. The cases of simultaneously strong (regular) refraction of the laser beam and significant beam broadening due to the effect of turbulence are revealed and analyzed.