

УДК 535.325+535.321.9

Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы.

Часть 1. Радиус когерентности и турбулентное уширение лазерного пучка

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.

Приводятся оценки радиуса когерентности и степени уширения лазерного пучка под влиянием турбулентности с использованием результатов дистанционного акустического зондирования пограничного слоя атмосферы содаром «Волна-4М». Рассмотрен средний суточный ход радиуса когерентности в различные сезоны года. Проведены расчеты добавок к эффективному радиусу лазерного пучка за счет турбулентности. Вычислены среднемесячные значения этих добавок. Выявлено заметное превышение возможного уширения лазерного пучка в зимнее время по сравнению с летним периодом.

Ключевые слова: атмосфера, зондирование, когерентность, лазерное излучение, содар, турбулентность, уширение лазерного пучка; atmosphere, sounding, coherence, laser radiation, sodar, turbulence, laser beam broadening.

Введение

При распространении лазерного пучка в атмосфере происходят его расширение и нарушение когерентности под действием турбулентности, а также регулярная рефракция из-за стратификации показателя преломления. Проблемы нацеливания оптических пучков через турбулентную атмосферу активно обсуждаются в литературе [1–3]. При этом в значительной части работ используются модельные профили как температуры воздуха, определяющей регулярную рефракцию, так и структурной характеристики показателя преломления, влияющей на когерентность и уширение лазерного пучка. Однако текущее состояние атмосферы может существенно отличаться от тех условий, которым соответствуют используемые модели. Поэтому при оперативной работе оптических приборов, требующих постоянного контроля за состоянием атмосферы, полезной может быть информация, получаемая какими-либо средствами дистанционной диагностики в режиме реального времени. В этой связи актуальной задачей является разработка методик и технических средств,

обеспечивающих текущую, а в перспективе и прогнозическую оценку «оптически активных» параметров среды распространения с удовлетворительным пространственно-временным разрешением. Одним из таких инструментов может служить метод дистанционного акустического зондирования атмосферы. Перспективность применения данного метода при решении задач оптики атмосферы отражена, например, в публикациях [4, 5], рассматривающих возможность использования получаемых этим методом результатов в астрономических наблюдениях.

В наших предыдущих статьях были приведены расчеты возможной рефракции лазерного излучения из-за температурной стратификации [6, 7], а также возможного уширения лазерного пучка под влиянием турбулентности в атмосферном пограничном слое (АПС) [8]. Оценки рефракции проводились по измеренным профилям температуры воздуха над урбанизированной территорией, а уширение пучка — по результатам диагностики АПС над естественным ландшафтом в теплое время года.

В первой части работы рассматриваются результаты обработки экспериментальных данных, полученных в условиях урбанизированной территории. Одна из целей работы заключалась в оценке возможных вариаций радиуса когерентности и степени уширения лазерного пучка в различные сезоны года в АПС под воздействием турбулентности. Кроме того, была поставлена задача дополнить результаты

* 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).

анализа профилей показателя преломления, полученных по измерениям в 2015–2016 гг. и опубликованных в работе [7], результатами за 2017–2018 гг. Это позволяет проследить сезонный ход показателя преломления и вычислить величины возможных «промахов» при нацеливании лазерного пучка на приемник (вторая часть данной работы). Определенное внимание было уделено случаям значительной рефракции лазерного пучка в АПС при его одновременном сильном уширении.

В целом обе части работы носят описательный характер без каких-либо обобщающих выводов о поведении исследуемых параметров. Основная задача публикуемых материалов – познакомить читателей с оценками возможных диапазонов изменений этих параметров в разные сезоны года.

Приборы, место и время проведения измерений

В качестве исходного экспериментального материала для оценок возможной регулярной рефракции лазерного пучка использовались профили температуры воздуха $T(z)$, измерявшиеся прибором МТР-5. Возможное уширение лазерного пучка под воздействием турбулентности рассчитывалось с применением профилей структурной характеристики показателя преломления оптических волн $C_n^2(z)$, полученных по результатам работы содара «Волна-4М». Достаточно подробное описание приборов МТР-5 и «Волна-4М» можно найти в [9, 10]. Кроме того, в приземном слое атмосферы для измерения как средних значений метеорологических параметров, так и характеристик турбулентности, включая оценки C_n^2 , применялась ультразвуковая метеостанция (УЗМ) «Метео-2» [11].

В представленном далее материале использованы результаты измерений в г. Томске (Академгородок). Приборы размещались на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН (пункт наблюдения «Томск»). Более подробно со структурой подстилающей поверхности в указанном пункте можно ознакомиться, например, в [12]. В обработку были включены результаты измерений с сентября 2015 г. по февраль 2018 г. Приборы МТР-5 и «Метео-2» работали в круглосуточном режиме (за исключением периодов их ремонта и/или калибровки). Содар «Волна-4М» работал ежедневно в интервале местного времени 08:00–21:00. Все приборы размещались в непосредственной близости друг от друга.

Особенности использования перечисленных выше приборов при получении исходных данных для оценок рефракции и уширения лазерного пучка изложены в работах [6–8]. Укажем только их основные характеристики.

Метеорологический температурный профилемер МТР-5 обеспечивал оценки температуры воздуха от уровня размещения до высоты 1000 м с шагом по высоте 50 м (среднее значение температуры в слое 50 м) и с шагом по времени 5 мин.

Ультразвуковая метеостанция «Метео-2» измеряла «мгновенные» значения метеорологических

параметров с периодичностью примерно 10 раз в секунду (на высоте 5 м от уровня крыши и 17 м от уровня подстилающей поверхности).

Результаты работы содара «Волна-4М» позволяли восстановить (рассчитать) профили $C_n^2(z)$ от 45 до 700 м над уровнем подстилающей поверхности (текущая высота зондирования определялась областью присутствия интенсивных турбулентных пульсаций температуры воздуха). Вычисление одного «мгновенного» профиля $C_n^2(z)$ производилось с шагом по высоте 5 м и с шагом по времени около 7 с. Особо отметим, что получаемая на какой-либо высоте z оценка C_n^2 соответствует среднему значению данной величины в объеме атмосферы от десятков (на нижних уровнях) до тысяч (на верхних уровнях) кубических метров при штатной длительности зондирующего импульса содара 150 мс.

Методика «продолжения» высотных профилей $C_n^2(z)$ от уровня УЗМ до высоты 45 м (минимальный уровень работы содара) была подобна методике, изложенной в [8]. Такая методика «привязки» высотных профилей структурной характеристики температуры воздуха $C_T^2(z)$, получаемой содаром и являющейся основой для определения $C_n^2(z)$, активно используется и другими исследователями [13]. Отметим также методику «привязки» содарных данных, основанную на использовании результатов измерений $C_T^2(z)$, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов [14, 15]. Здесь упомянуты только те случаи, когда пункт наблюдения не был обеспечен средствами измерения $C_T^2(z)$, размещенными на нескольких уровнях на стационарных метеорологических мачтах достаточно большой высоты.

Радиус когерентности

Одной из целей проведенной нами работы являлась оценка возможного уширения лазерного пучка под воздействием турбулентности при его распространении на относительно коротких трассах длиной L в пределах АПС при расположении источника излучения вблизи подстилающей поверхности. В качестве параметра, характеризующего «турбулентное» уширение, был выбран эффективный радиус пучка $R_t \propto L/r_0$, где r_0 – радиус когерентности оптической волны в турбулентной среде [3]. Поскольку величина $R_t(L, \lambda)$ определяется, в том числе, радиусом когерентности $r_0(L, \lambda)$, то рассмотрим в первую очередь его оценки с привлечением экспериментальных данных о структуре турбулентности в АПС в различных условиях.

Согласно [3] после прохождения лазерного излучения, имеющего длину волны λ (м), по заданной трассе радиус когерентности r_0 (м) в конце трассы можно вычислить по формуле

$$r_0(L, \lambda) = \left[1,46k^2 \cdot \int_0^L C_n^2(h, \lambda)(1-h/L)^{5/3} dh \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, m^{-1} ; $C_n^2(h, \lambda)$ – структурная характеристика показателя преломления

на удалении h (м) от источника излучения (вдоль трассы), $m^{-2/3}$; L (м) — длина трассы от источника, находящегося на высоте z_0 вблизи подстилающей поверхности, до точки регистрации («мишени»), находящейся на высоте $z \leq 1000$ м. Указанный высотный диапазон связан с предельной высотой получения профилей температуры воздуха прибором МТР-5 и потенциальными возможностями содара «Волна-4М». Трасса может быть как вертикальной, так и наклонной. Наклон трассы задается зенитным углом выхода луча из источника θ (будут рассматриваться только случаи $\theta \leq 85^\circ$). Предполагается, что атмосфера — плоскостная среда. Такое предположение допустимо в связи с относительно короткими трассами распространения лазерного излучения (до 11–12 км). В этом случае $L \approx z \cdot \sec\theta$. Далее вместо указания длины трассы L , в конце которой оцениваются значения $r_0(L, \lambda)$, будут приводиться высоты z и зенитные углы θ с целью конкретизации положения «мишени». С учетом сделанного приближения формулу (1) можно преобразовать к виду

$$r_0(z, \theta, \lambda) = \left[1,46k^2 \cdot \sec\theta \cdot \int_{z_0}^z C_n^2(z', \theta, \lambda) (1 - z'/z)^{5/3} dz' \right]^{-3/5}. \quad (2)$$

Аналогичная формула была использована нами для вычисления радиуса когерентности в работе [8]. Фигурирующие в формуле (2) профили $C_n^2(z)$ при $\theta = 0^\circ$ определяются усреднением «мгновенных» профилей по 5-минутным интервалам времени. Если же $\theta > 0^\circ$, то в (2) используются профили $C_n^2(z)$, усредненные за 10 мин.

Необходимо сделать еще одно замечание относительно применимости формул (1) и (2). Они подразумевают, что интенсивность «оптической» турбулентности, характеризующаяся величиной C_n^2 , должна относиться к разряду «слабой» (или «средней»). Для случая «сильной» турбулентности формулы (1) и (2) могут служить только как оценочные. Поскольку в литературе нам не удалось найти формулы для «инженерных» расчетов r_0 в случаях «сильной» турбулентности, то в представленном далее материале оценки радиуса когерентности проводились по формуле (2) для всего спектра возможных значений C_n^2 . Надеемся, что в дальнейшем для «сильной» турбулентности необходимые формулы будут получены и мы сможем уточнить приведенные ниже результаты.

Изменчивость r_0 , рассчитанного для трассы длиной L с зенитным углом θ , как в течение суток, так и в разные сезоны года весьма велика. По этой причине нет возможности дать его исчерпывающее описание, охватывающее весь спектр возможных значений. Учитывая это, рассмотрим лишь средний суточный ход (ССХ) r_0 в отдельные месяцы года. При этом «полный» суточный ход восстановить не представляется возможным, поскольку профили $C_n^2(z)$ были получены (рассчитаны) только в интервале

местного времени 08:00–21:00. Тем не менее даже в этот относительно короткий интервал времени имеют место определенные закономерности поведения r_0 . В качестве примера приведем рис. 1, а, на котором показаны ССХ r_0 в январе и июне 2016 г. в пункте наблюдения «Томск». Оценки сделаны для варианта $z = 100$ м, $\theta = 0^\circ$ и $\lambda = 1$ мкм. Сплошные символы на рис. 1, а соответствуют средним значениям r_0 за часовой интервал. Открытые символы — медианы r_0 . Отрезками показаны среднеквадратические отклонения (СКО) r_0 .

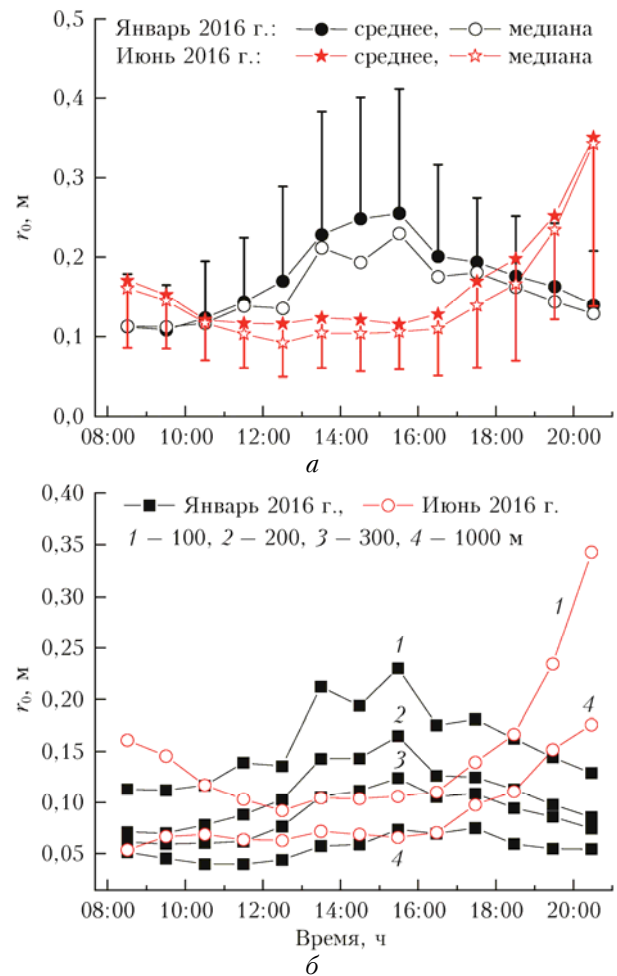


Рис. 1. Средний суточный ход радиуса когерентности для случая $\theta = 0^\circ$, $\lambda = 1$ мкм в январе и июне 2016 г.: высота 100 м (а), набор высот (медианные значения) (б)

Приведенный на рис. 1, а пример демонстрирует различие ССХ r_0 в зимнее и летнее время на высоте 100 м. В январе 2016 г. атмосфера была наиболее «прозрачна» (с точки зрения влияния турбулентности на когерентность лазерного излучения) в дневное время, а в июне — вечером. Обратим также внимание на то, что СКО r_0 зимой в дневное время больше, чем в утренние и вечерние часы. Однако в летнее время имеет место обратная ситуация: днем СКО r_0 меньше, чем утром и вечером.

Изменение значений r_0 (в рамках ССХ) с увеличением высоты демонстрирует рис. 1, б. Указанная выше закономерность ССХ r_0 на разных высотах

в целом сохраняется. Только ее акцентированность с увеличением высоты уменьшается. Для июня 2016 г. приведены лишь графики на высотах 100 и 1000 м. Отметим, что поведение ССХ r_0 на рис. 1 в летнее дневное время подобно дневному ходу r_0 , приведенному в [16] для наклонной трассы длиной примерно 17 км с перепадом высот порядка 750 м.

Изменения ССХ r_0 на высоте 1000 м в разные сезоны 2016 г. при $\lambda = 1$ мкм и $\theta = 0^\circ$ иллюстрирует рис. 2. В теплый период года в вечерние часы влияние турбулентности на когерентность оптических волн становится минимальным. Можно заметить, что максимальные значения осредненного радиуса когерентности приходятся примерно на период перед заходом Солнца.

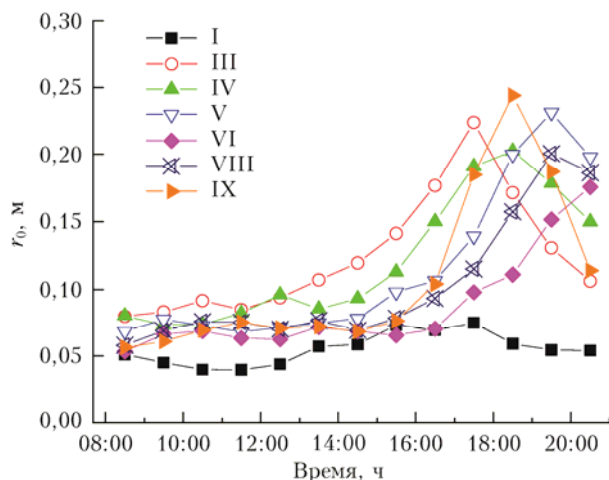


Рис. 2. Средний суточный ход радиуса когерентности (медианные значения) для случая $z = 1$ км, $\theta = 0^\circ$, $\lambda = 1$ мкм в различные месяцы 2016 г. (указаны цифрами около соответствующих символов)

Статистическая обеспеченность приведенных на рис. 1 и 2 результатов составляла не менее 13 дней в месяц для каждого часового интервала усреднения. Наименьшая статистика приходилась на утренние часы (08:00–10:00 по местному времени) из-за некоторых особенностей работы содара. Отметим также, что при оценках ССХ r_0 не учитывались текущие синоптические условия и возможное наличие облачности в пределах пограничного слоя атмосферы.

Представленные на рис. 1 и 2 результаты получены при вертикальной ориентации лазерного луча. Для наклонных трасс значения r_0 будут меньше. Степень уменьшения определяется в первую очередь множителем $\sec\theta$ в формуле (2). Например, при зенитном угле излучения $\theta = 85^\circ$ значения r_0 уменьшаются примерно в 4,3 раза (без учета влияния возможной изменчивости C_n^2 в горизонтальной плоскости).

Приведенные выше результаты относятся к пункту наблюдений «Томск» и определяются микроструктурой температурной турбулентности в пограничном слое атмосферы, характерной для данного пункта (урбанизированная территория). Изменение места проведения измерений может внести определенные коррективы в ССХ r_0 . У нас не было возможности одновременных наблюдений в отличающихся по

структуре подстилающей поверхности районах. Тем не менее полезным может оказаться сравнение ССХ r_0 , рассчитанных для разных пунктов наблюдений в совпадающие сезоны, хотя и в разные годы. В частности, на рис. 3, а приведено сопоставление ССХ r_0 (средние значения) на высоте 1000 м, рассчитанных для сентября–октября 2009 г. в пункте «Фоновый» и для сентября–октября 2016 г. в пункте «Томск», а на рис. 3, б – для июня 2016 г. («Томск») и для июля 2010 г. («Фоновый»). Отрезками указаны СКО. Более подробно описание пункта наблюдений «Фоновый», а также результаты анализа r_0 и его ССХ в этом пункте приведены в статье [8]. Укажем лишь, что данный пункт расположен в лесной местности на берегу р. Оби.

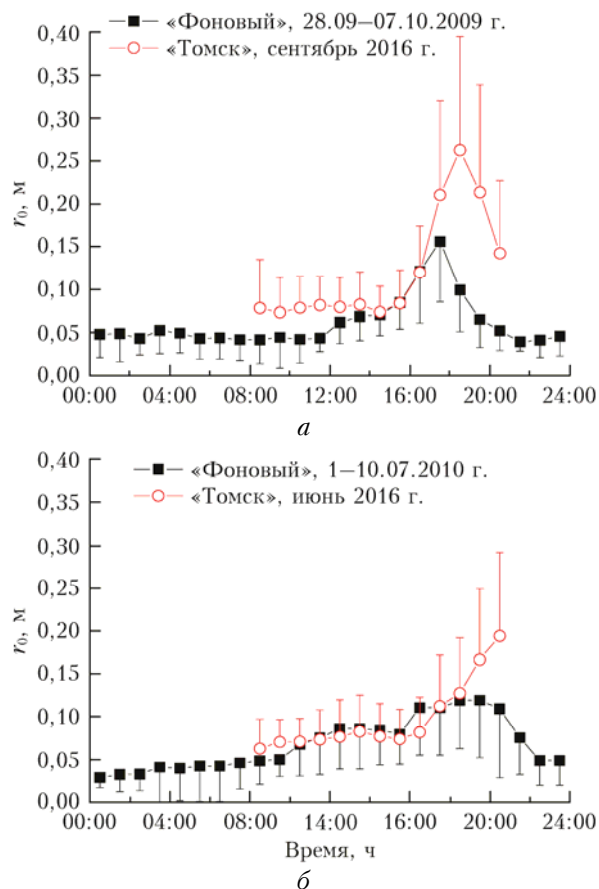


Рис. 3. Средний суточный ход радиуса когерентности (средние значения с указанием СКО) для случая $z = 1$ км, $\theta = 0^\circ$, $\lambda = 1$ мкм в пунктах наблюдения «Томск» и «Фоновый» в осенние (а) и летние (б) месяцы

Поскольку в пункте «Фоновый» измерения проводились круглосуточно, а в пункте «Томск» только в интервале 08:00–21:00, то полностью сопоставить суточный ход r_0 в этих пунктах не представляется возможным. Можно лишь отметить, что в сравниваемых эпизодах в вечернее время атмосфера над пунктом «Томск» в среднем более «прозрачна» с точки зрения возможного воздействия турбулентности на когерентность лазерного излучения. Такое различие может быть следствием более интенсивного турбулентного теплообмена между атмосферой и подстилающей

поверхностью в вечернее время в лесистой прибрежной местности по сравнению с урбанизированной территорией.

Уширение лазерного пучка под влиянием турбулентности

Рассмотрим далее возможное уширение лазерного пучка под воздействием турбулентности. Предполагается, что источник лазерного излучения находится вблизи подстилающей поверхности на уровне z_0 . С использованием формулы для эффективного радиуса пучка [3] запишем его составляющую $R_t(L, \lambda)$ (м), связанную с влиянием турбулентности по трассе распространения, в виде

$$R_t(L, \lambda) = \frac{L}{kr_0(L, \lambda)} = \frac{z \cdot \sec \theta}{kr_0(z, \theta, \lambda)}. \quad (3)$$

После подстановки (2) в (3) можно получить формулу

$$R_t(L, \lambda) = R_t(z, \theta, \lambda) \approx \approx 1,81z\lambda^{-1/5} (\sec \theta)^{8/3} [F(z, \theta, \lambda)]^{3/5}, \quad (4)$$

где

$$F(z, \theta, \lambda) = \int_{z_0}^z C_n^2(z', \theta, \lambda) (1 - z'/z)^{5/3} dz'. \quad (5)$$

Зависимость функции $F(z, \theta, \lambda)$ ($\text{м}^{1/3}$) от зенитного угла θ означает, что структурная характеристика C_n^2 в какой-либо точке горизонтальной плоскости на высоте z может отличаться от значения непосредственно над пунктом наблюдения (при $\theta = 0^\circ$). Методика учета возможной неоднородности распределения C_n^2 по трассе была пояснена ранее (после формулы (2)). Отметим, что принимать во внимание зависимость функции $F(z, \theta, \lambda)$ от λ имеет смысл только при переходе в высокочастотную (ультрафиолетовую) область спектра [8]. Это объясняется тем, что приближения, используемые в выражении (5), включая особенности получения профилей C_n^2 содаром, вносят более существенные погрешности в оценки $F(z, \theta, \lambda)$, чем неучет влияния длины волны в видимой и инфракрасной областях спектра.

Поскольку параметр R_t обратно пропорционален r_0 , то закономерности суточного хода, выявленные ранее для r_0 в пункте наблюдения «Томск», будут проявляться и в поведении R_t (только с «обратным знаком»). Коротко рассмотрим статистику рассчитанных значений R_t в разных условиях. На рис. 4, а, б приведены графики R_t на высотах 100 и 1000 м, полученные на основе измерений в феврале и мае 2017 г. Оценки сделаны для длины оптической волны $\lambda = 1$ мкм и зенитного угла $\theta = 85^\circ$. Гистограммы значений R_t , приведенных на графиках, представлены на рис. 4, в. При расчетах длины трасс распространения составляли: $L = 1147$ м

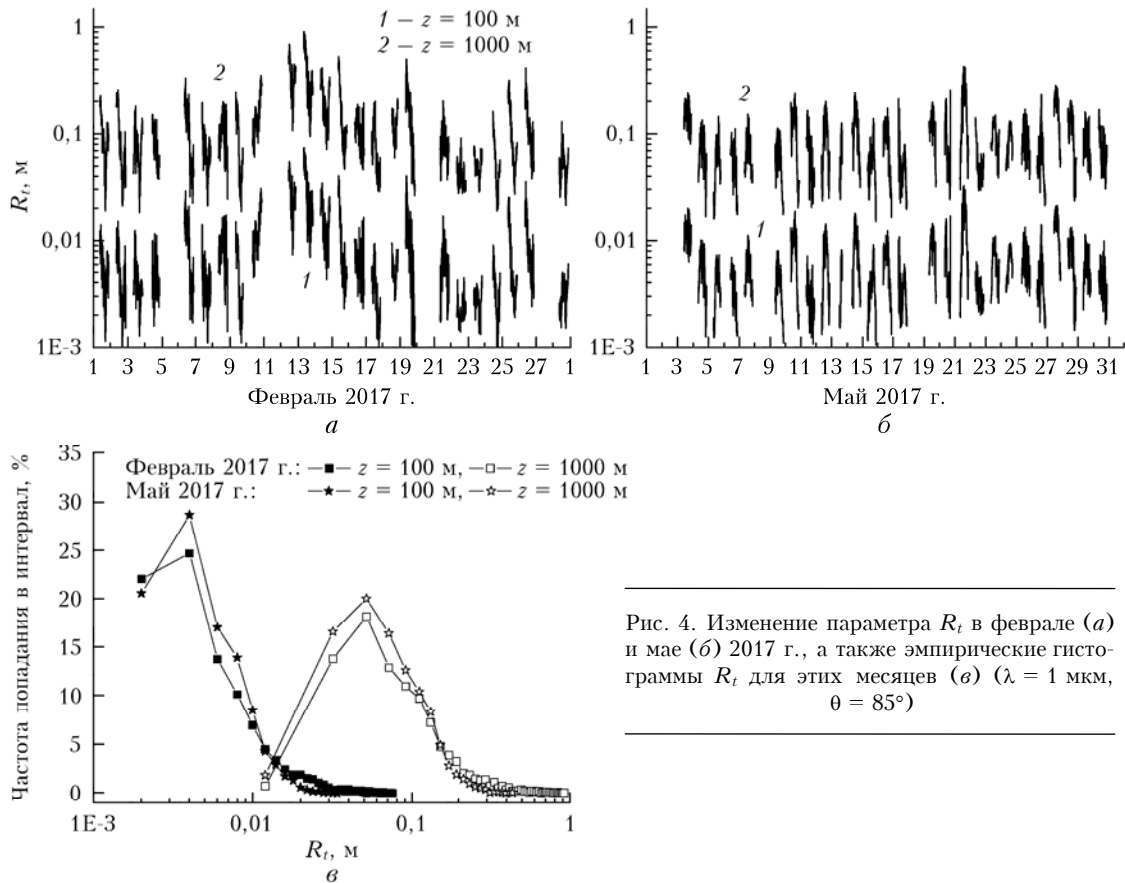


Рис. 4. Изменение параметра R_t в феврале (а) и мае (б) 2017 г., а также эмпирические гистограммы R_t для этих месяцев (в) ($\lambda = 1$ мкм, $\theta = 85^\circ$)

при $z = 100$ м и $L = 11474$ м при $z = 1000$ м. Напомним, что в расчетах использовались только измерения в период 08:00–21:00. Именно поэтому графики на рис. 4, а, б имеют фрагментарный вид (также имели место перерывы в измерениях в отдельные дни).

Сезонный ход возможного уширения лазерного пучка можно проиллюстрировать среднемесячными значениями R_t . На рис. 5 показаны средние (и медианные) значения R_t на высоте 1000 м при излучении лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 1$ мкм под зенитным углом $\theta = 85^\circ$. Приведены результаты обработки наблюдений за период с сентября 2015 г. по февраль 2018 г. включительно. Также показаны («полуотрезками») СКО. Числа над символами – длительность наблюдений в текущем месяце (часы, округленно). Необходимо отметить, что оценки r_0 и R_t в декабре 2016 г. и январе 2017 г. были получены без учета реальных профилей температуры воздуха в АПС в связи с ремонтом прибора МТР-5 (использовалась модель изотермического распределения температуры воздуха).

Согласно рис. 5 в зимнее время среднесуточные значения R_t несколько больше, чем в остальные сезоны года. Это можно объяснить, по-видимому, повышенным влиянием на уровень температурной турбулентности сдвиговых напряжений при сильных инверсиях температуры в нижней части АПС, а также тепловыми потоками от зданий, окружающих точку размещения измерительных приборов. На этот факт мы уже обращали внимание при изучении особенностей поведения структурной характеристики C_n^2 в приземном слое атмосферы в различных пунктах наблюдения [17].

Считаем необходимым отметить, что выявленное в пункте наблюдений «Томск» повышение значений R_t в зимнее время, по сравнению с теплым периодом года, не является уникальным. Например,

в работе [18] опубликованы результаты измерения C_n^2 на разных высотах в сельской местности как в летнее, так и в зимнее время 2011 г. Согласно этим результатам в январе достаточно длительное время значения C_n^2 на высоте 64 м были на один-два порядка больше, чем в июле. Понятно, что такое распределение C_n^2 может приводить и к повышенным среднемесячным значениям R_t в зимнее время по сравнению с летним. Обратим также внимание на то, что во время этих экспериментов в комплексе приборов применялся, в том числе содар для оценок профилей C_n^2 [19].

Приведенные выше оценки параметра R_t были получены для $\lambda = 1$ мкм. Изменение длины волны при вычислениях R_t в видимой и инфракрасной областях спектра легко учитывается, поскольку имеет место зависимость $R_t \propto \lambda^{-1/5}$ (см. формулу (4)). Однако при переходе в ультрафиолетовую область спектра зависимость R_t от длины волны усложняется [8]. Здесь мы этот случай рассматривать не будем.

Без иллюстраций укажем, что оценки среднемесячных значений r_0 для случая $z = 1000$ м, $\theta = 85^\circ$, $\lambda = 1$ мкм за период измерений с сентября 2015 г. по февраль 2018 г. изменялись от 8 до 30 мм. Сезонный ход значений $r_0 \propto 1/R_t$ противоположен сезонному ходу R_t . Отметим, что сезонный ход вычисленных значений r_0 в пункте наблюдения «Томск» по тенденции близок к сезонному ходу данного параметра, полученному на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН на побережье оз. Байкал (по измерениям в феврале–октябре 2016 г.) [20, 21]. Только «среднесезонные» значения r_0 в пункте «Томск» были примерно в 1,5–2 раза меньше, чем при наблюдениях на БСВТ. Вероятно, такое различие обусловлено существенным отличием характеристик турбулентности в АПС над пунктами наблюдения «Томск» и БСВТ.

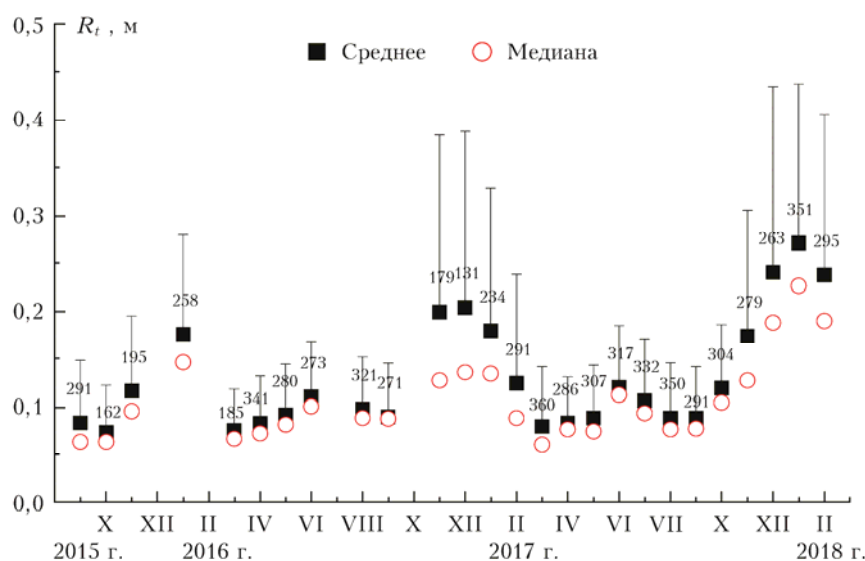


Рис. 5. Средние и медианные (за месяц) значения R_t , вычисленные для $z = 1$ км, $\lambda = 1$ мкм, $\theta = 85^\circ$ ($L = 11,5$ км)

Считаем необходимым отметить, что для верификации методики определения высотно-временных профилей абсолютных значений структурной характеристики показателя преломления C_n^2 на основе дистанционного акустического зондирования пограничного слоя атмосферы желательнее провести совместные эксперименты с привлечением других инструментов получения данной величины. В перспективе такая возможность обеспечивается использованием лазерных методов и технических средств диагностики атмосферы, опубликованных, например, в [22, 23].

В условиях урбанизированной территории, характеризующейся повышенным уровнем антропогенных акустических помех, при использовании содара «Волна-4М» возможны некоторые переоценка величин r_0 и недооценка значений R_t в случаях $C_n^2 < 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$, особенно для верхних уровней в пограничном слое атмосферы.

Заключение

Подводя итог, можно сделать следующие выводы. Полученные оценки радиуса когерентности r_0 лазерного пучка в турбулентной атмосфере с использованием результатов дистанционного акустического зондирования пограничного слоя атмосферы имеют значения, адекватные экспериментальным оценкам других исследователей. Получен средний суточный ход r_0 , выявлены его особенности для разных сезонов года. Имеется некоторое различие суточного хода r_0 на разных высотах, особенно в зимнее время. Проведено сопоставление среднего суточного хода r_0 в теплое время года в двух различных по структуре подстилающей поверхности пунктах наблюдения. В целом суточный ход r_0 в сравнивавшихся пунктах сопоставим как по значениям, так и по общим закономерностям. С использованием радиуса когерентности r_0 были вычислены возможные добавки к эффективному радиусу лазерного пучка R_t за счет турбулентности. На основе экспериментальных данных, полученных в 2015–2018 гг., выявлен сезонный ход возможных значений R_t . Установлено, что в зимнее время среднесезонные значения R_t заметно превышают оценки для теплого времени года.

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

1. Лукин В.П. Возможности нацеливания оптических пучков через турбулентную атмосферу // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 75–86.
2. 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 атмосф. 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.

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 атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 338–345.
4. Travouillon T., Schöck M., Els S., Riddle R., Skidmore W. Using a sodar to measure optical turbulence and wind speed for the thirty meter telescope site testing. Part I: Reproducibility // Bound.-Layer Meteorol. 2011. V. 141, N 2. P. 273–288.
5. Travouillon T., Schöck M., Els S., Riddle R., Skidmore W. Using a sodar to measure optical turbulence and wind speed for the thirty meter telescope site testing. Part II: Comparison with independent instruments // Bound.-Layer Meteorol. 2011. V. 141, N 2. P. 289–300.
6. Одицов 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.
7. Одицов 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.
8. Одицов 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.
9. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профилимерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
10. Камардин А.П., Гладких В.А., Одицов С.Л., Федоров В.А. Метеорологический акустический доплеровский локатор (содар) «ВОЛНА-4М-СТ» // Приборы. 2017. Т. 202, № 4. С. 37–44.
11. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. Т. 109, № 7. С. 21–25.
12. Мамышева А.А., Одицов С.Л. Экспериментальная оценка кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 817–827.
13. Petenko I., Mastrantonio G., Viola A., Argentini S., Pietroni I. Some statistics of the temperature structure parameter in the convective boundary layer observed by sodar // Bound.-Layer Meteorol. 2014. V. 150, N 2. P. 215–233.
14. Wainwright C.E., Bonin T.A., Chilson P.B., Gibbs J.A., Fedorovich E., Palmer R.D. Methods for evaluating the temperature structure function parameter using unmanned aerial systems and large-eddy simulation // Bound.-Layer Meteorol. 2015. V. 155, N 2. P. 189–208.
15. Bonin T.A., Goines D.C., Scott A.K., Wainwright C.E., Gibbs J.A., Chilson P.B. Measurement of the temperature structure-function parameters with small unmanned aerial system compared with a sodar // Bound.-Layer Meteorol. 2015. V. 155, N 3. P. 417–434.

16. Andrews L.C., Philips R.L., Crabbs R., Wayne D., Leger T., Sauer P. Creating a C_n^2 profile as a function of altitude using scintillation measurements along a slant path // Proc. SPIE. 2012. V. 8238. P. 82380F-1–12.
17. Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Экспериментальные оценки структурной характеристики показателя преломления оптических волн в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 309–318; Gladkikh V.A., Mamyshev V.P., Odintsov S.L. Experimental estimates of the structure parameter of the refractive index for optical waves in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 5. P. 426–435.
18. Sprung D., Grossmann P., Suher 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.
19. Sprung D., Suher E., Weiss-Wrana K., Stein K. Stability and height dependant variations of the structure function parameters in the lower atmospheric boundary layer investigated from measurements of the long-term experiment VERTURM (vertical turbulence measurements) // Proc. SPIE. 2011. V. 8178. P. 817809-1–12.
20. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904; Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chupakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu. Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.
21. Ковадло П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Работы по набору данных измерения турбулентности в различные сезоны года // Материалы XXIII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 3–7 июля 2017. Иркутск. С. В151–В154.
22. Разенков И.А. Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48; Razenkov I.A. Turbulent lidar: I – Desing // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 273–280.
23. Разенков И.А. Турбулентный лидар. II. Эксперимент // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 81–89; Razenkov I.A. Turbulent lidar: II – Experiment // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 281–289.

S.L. Odintsov, V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, V.P. Mamyshev, I.V. Nevzorova. Assessment of the influence of turbulence and regular refraction on laser beam characteristics in the atmospheric boundary layer. Part 1. Coherence length and turbulent broadening of a laser beam.

The coherence length and the degree of broadening of a laser beam under the action of turbulence are estimated from the results of remote acoustic sounding of the atmospheric boundary layer with the Volna-4M sodar. The daily average profile of the coherence length in different seasons is considered. Corrections to the effective radius of a laser beam due to turbulence and the monthly average values of these corrections are calculated. A noticeable excess of the possible broadening of the laser beam in winter above that in summer is revealed.