

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 621.373.628.551.510.3

Усиление лидарного сигнала в режиме сильной оптической турбулентности

В.А. Банах, Л.О. Герасимова, И.В. Залозная, А.В. Фалиц*

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

Поступила в редакцию 13.03.2018 г.

Представлены экспериментальные данные о вариациях коэффициента усиления лидарного сигнала, возникающего в турбулентной атмосфере, при изменениях структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха. Установлено, что по мере увеличения структурной постоянной коэффициент усиления сначала возрастает, достигая максимума, затем, с переходом в режим сильной оптической турбулентности на трассе зондирования, уменьшается. Максимальное значение коэффициента усиления, достижимое на заданном расстоянии, зависит от интенсивности оптической турбулентности в момент измерений. Временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния хорошо согласуется с временными изменениями структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха, определяемой из независимых измерений.

Ключевые слова: оптическая турбулентность, лидар, усиление обратного рассеяния; optical turbulence, lidar, backscattering amplification.

Введение

Задача создания дистанционного измерителя структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , характеризующей интенсивность оптической турбулентности в атмосфере, давно привлекает внимание исследователей. В частности, в работах [1–4] представлены результаты, демонстрирующие возможность лидарного измерения структурной постоянной и восстановления ее высотных профилей по рассеянному аэрозолем лазерному излучению. В [1, 2] это осуществляется на основе измерений радиуса пространственной когерентности поля рассеянного излучения, в [4] информация о структурной постоянной извлекается из дисперсии случайных смещений изображения рассеивающего аэрозольного объема. В обоих случаях для определения C_n^2 требуется регистрировать распределение интенсивности рассеянной волны в фокальной плоскости приемного телескопа, что усложняет процесс обработки лидарного эхосигнала.

Собственно лидарный способ определения интенсивности оптической турбулентности, когда приемником регистрируется средняя мощность эхосигнала и не требуется использовать матричный приемник для регистрации распределения интенсивности принимаемого сигнала, впервые предложен в [5, 6].

Способ основан на использовании эффекта усиления обратного рассеяния в случайных средах [7] и сводится к регистрации двух эхосигналов, в одном из которых средняя принимаемая мощность зависит от интенсивности оптической турбулентности вследствие прохождения зондирующим излучением и рассеянной волной одних и тех же случайных неоднородностей показателя преломления на трассе распространения, а в другом – нет. В [8] представлены первые результаты экспериментальных исследований усиления мощности обратнорассеянного в атмосфере лазерного излучения с использованием лидарной схемы с двумя передающими и одним приемным каналами, предложенной в [6].

Результаты дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на развитие этого способа, представлены в [9–15]. В частности, в работах [9–12] изучены возможности определения интенсивности оптической турбулентности лидарной системой, в которой, в отличие от [6, 8], реализована конструкция с одним передающим и двумя приемными каналами. В экспериментах на двухкилометровой трассе [2, 11] проведено сопоставление результатов измерения коэффициента усиления обратного рассеяния с использованием этой системы с данными измерений дисперсии дрожаний оптического изображения некогерентного источника света, величина которой прямо пропорциональна интегральному значению структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха на трассе зондирования. Показано, что коэффициент усиления обратного рассеяния изменяется во времени коррелированно

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Лилия Олеговна Герасимова (lilyan@iao.ru); Ия Викторовна Залозная (iya@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru).

с вариациями дисперсии дрожаний изображения, что доказывает возможность лидарного измерения интенсивности оптической турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния.

Трасса зондирования в экспериментах [11, 12] проходила между зданием Института оптики атмосферы и одним из жилых домов над пересеченной местностью с городской застройкой на высоте от 10–15 до 100–150 м над землей, что не позволяло провести сравнение с прямыми измерениями C_n^2 . В данной работе представлены результаты исследований, основной целью которых было выявление закономерностей изменения регистрируемой средней мощности рассеянного строго назад лазерного излучения в зависимости от интенсивности оптической турбулентности на однородной приземной трассе в атмосфере с одновременными измерениями C_n^2 независимыми измерителями.

Описание эксперимента

Эксперимент проводился в окрестности пос. Черная речка Томской обл. 16 и 17 июня 2017 г. Измерительная трасса протяженностью 2,11 км проходила на высоте 2–3 м над ровным полем, покрытым травой. Регистрация уровня мощности рассеянного излучения выполнялась с использованием двух лидарных систем: некогерентного лидара для измерения коэффициента усиления обратного рассеяния и когерентного лидара. Транспортная версия лидара УОР-4 для измерения коэффициента усиления, использовавшаяся в эксперименте, имеет одну приемную апертуру, совмещенную с передающей, но два приемника, на один из которых поступает сигнал из центральной приосевой части апертуры для регистрации излучения, рассеянного строго назад, а на второй – из периферийной кольцевой части, имеющей ту же площадь, что и центральная.

Отношение регистрируемых этими приемниками средних мощностей экосигнала определяет величину возрастания обратного рассеяния, возникающего в турбулентной атмосфере за счет корреляции зондирующего и рассеянного излучений в приосевой области. У применявшегося в эксперименте когерентного лидара Stream Line приемная и передающая апертуры также совмещены, но используется лишь один приемник, поэтому лидар всегда регистрирует излучение, рассеянное строго назад, и средняя мощность регистрируемого экосигнала может возрастать за счет эффекта усиления обратного рассеяния в случайной среде.

Импульсный когерентный доплеровский лидар Stream Line и лидар для измерения коэффициента усиления УОР-4 [15] располагались на ровной площадке в начале трассы. В конце трассы был установлен щит, от которого принимался рассеянный сигнал лидара Stream Line. Рядом с лидарами размещался пассивный оптический измеритель C_n^2 [16]. Он обеспечивал дистанционное измерение усредненного по трассе значения структурной постоянной по дисперсии дрожаний выделенного участка видеозображения щита в конце трассы. В начале и в конце трассы располагались метеостанции АМК-03, измерявшие метеопараметры на высоте 2 м от подстилающей поверхности, из которых рассчитывались локальные значения структурной постоянной на удалении 60 и 2100 м от начала трассы. Во время эксперимента стояла ясная безветренная жаркая погода с дневной температурой выше 30 °С, так что реализовались условия развитой конвективной турбулентности.

Результаты эксперимента

На рис. 1 представлен график изменения во времени C_n^2 , рассчитанной из данных о температурных флуктуациях, регистрируемых акустическими метеостанциями.

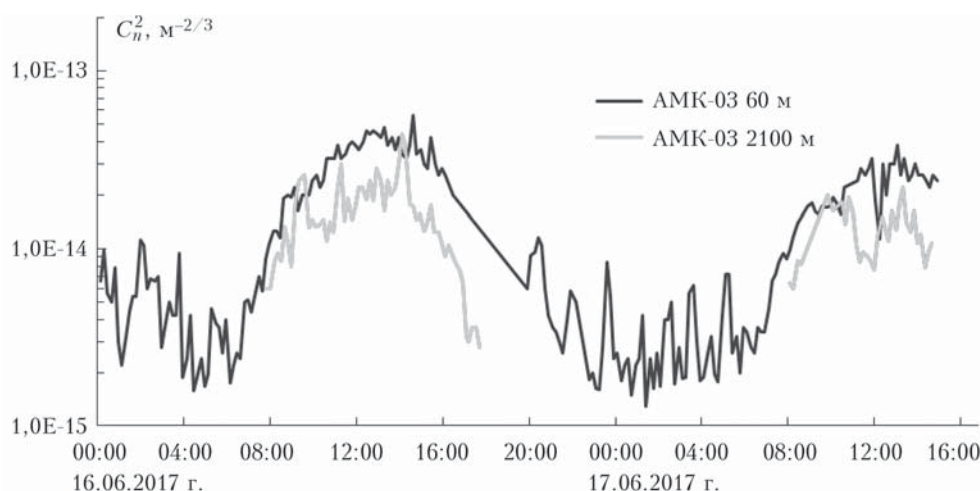


Рис. 1. Динамика изменения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления, рассчитанная по данным акустических метеостанций, 16–17 июня 2017 г. (время местное)

Видно, что интенсивность оптической турбулентности непрерывно возрастала одновременно с увеличением температуры воздуха в дневное время примерно с 06:00 до 12:00. Значения структурной постоянной изменялись от $2 \cdot 10^{-15}$ ночью до $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ в послеполуденное время.

Результаты измерений коэффициента усиления обратного рассеяния лидаром УОР-4 [15] показаны на рис. 2, 3 (N -фактор). Временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния на дистанции 500 м за двое суток показан на рис. 2. Минимальные значения интенсивности турбулентности и коэффициента усиления наблюдались в 07:00 и в 19:00 соответственно. В ночное время N -фактор достигал своего максимального значения 1,27 примерно в 02:00 16 и 17 июня. В дневное время N -фактор принимал

максимальные значения в диапазоне от 1,4 до 1,6 примерно с 09:00 до 17:00.

На рис. 3 временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния на дистанции 500 м сопоставляется с данными локальных измерений структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха акустическими метеостанциями в начале и конце трассы. Видно, что временной ход структурной постоянной C_n^2 хорошо согласуется с временным ходом коэффициента усиления обратного рассеяния.

На рис. 4 показана динамика изменения во времени средней мощности эхосигнала когерентного лидара Stream Line. Время накопления эхосигнала составляло 0,2 с. Регистрация проводилась непрерывно в течение двух суток, но из-за регулярной

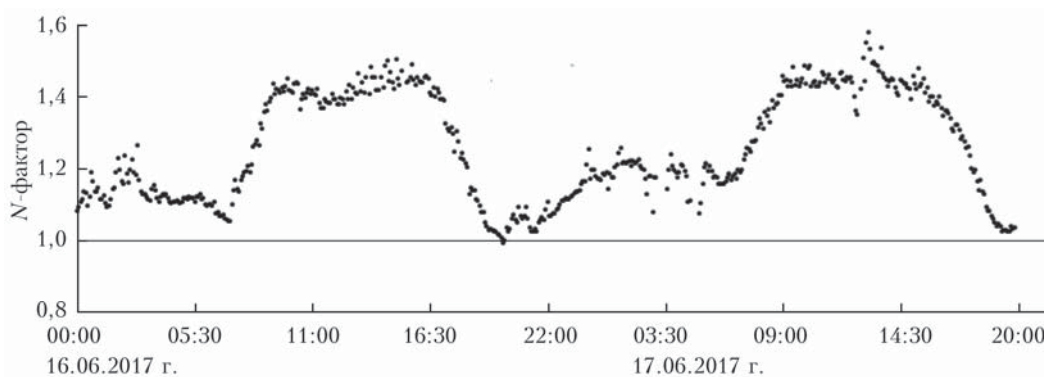


Рис. 2. Временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния на дистанции 500 м (время местное)

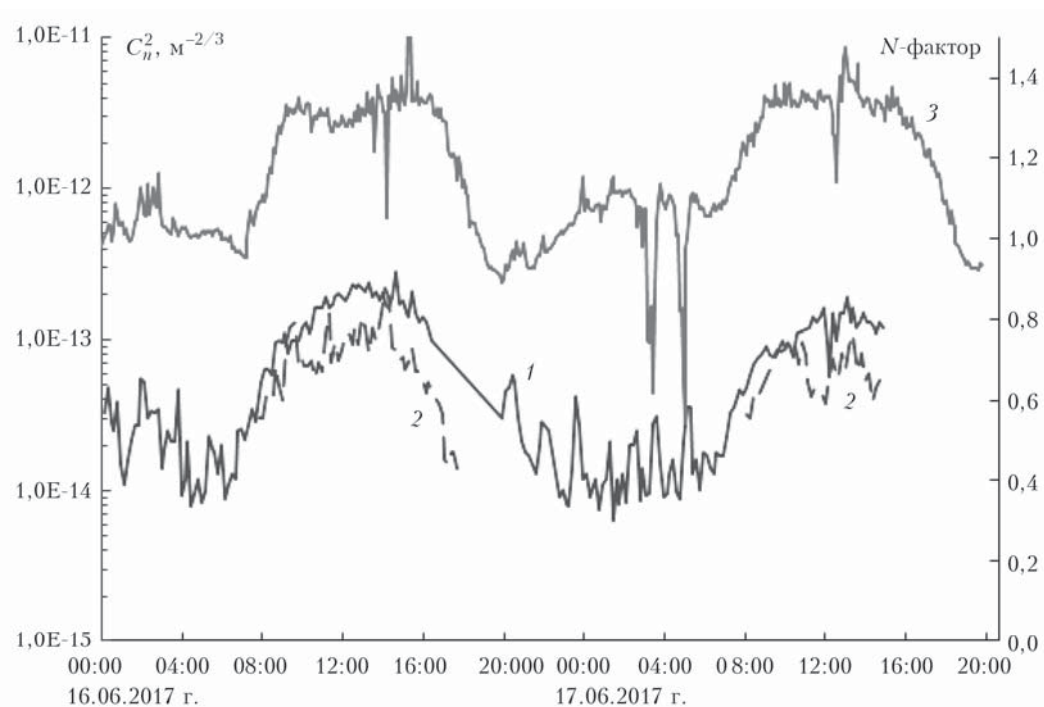


Рис. 3. Динамика изменения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления, рассчитанная по данным акустических метеостанций (кривые 1 и 2), и временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния на дистанции 500 м (кривая 3) 16–17 июня 2017 г.

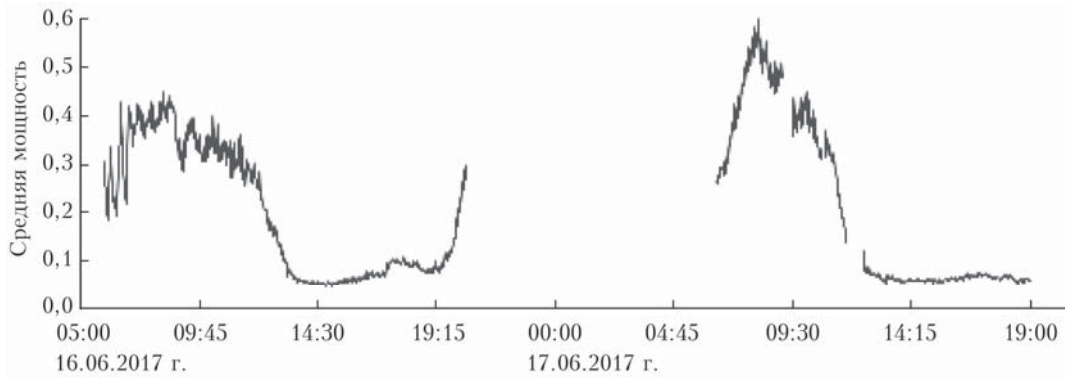


Рис. 4. Средняя мощность эхосигнала импульсного когерентного лидара

рефракции лазерного пучка необходимо было периодически выполнять процедуру наведения лазерного луча на поверхность щита, от которого принимался отраженный сигнал. Помимо этого, в ночное время суток наблюдался туман, что приводило к резким скачкам и сильному ослаблению принимаемого отраженного излучения. Поэтому из всего набора зарегистрированных данных были выбраны такие временные промежутки, в течение которых изменения средней мощности сигнала заведомо были обусловлены изменениями интенсивности оптической (температурной) турбулентности на трассе распространения лазерного излучения.

Из анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 1 и 4, следует, что по мере развития турбулентности в результате прогрева подстилающей поверхности наблюдается возрастание средней мощности эхосигнала лидара Stream Line вследствие эффекта усиления обратного рассеяния в случайной среде. Это видно по данным, зарегистрированным примерно с 06:00 до 08:00 16 и 17 июня (см. рис. 1). Далее с ростом интенсивности турбулентности, когда радиус пространственной когерентности поля зондирующего пучка в конце двухкилометровой трассы уменьшается до 3–4 мм, происходят насыщение уровня регистрируемой мощности эхосигнала и последующее ее уменьшение, что и наблюдается с 8:00 до 16:00 16 июля (рис. 4). В вечернее время, когда поток солнечной радиации уменьшается, интенсивность турбулентности начинает уменьшаться (см. рис. 1) и снова происходит увеличение уровня регистрируемой мощности эхосигнала (с 15:00 до 20:00 16 июня).

Такое поведение средней мощности эхосигнала, регистрируемого лидаром Stream Line, объясняется тем, что начиная с 08:00 в данном эксперименте интенсивность турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха становилась столь велика, что на трассе, на которой проводились измерения, устанавливался режим сильной оптической турбулентности. Переход в этот режим сопровождается настолько сильным ухудшением пространственной когерентности излучения зондирующего лазерного пучка, что не только нивелируется увеличение средней мощности эхосигнала за счет эффекта усиления обратного рассеяния, но и когерентный при-

ем становится невозможным. Это видно по данным на рис. 4, зарегистрированным примерно с 13:00 до 16:00 16 июня и с 13:00 до 19:00 17 июня, когда средняя мощность регистрируемого эхосигнала когерентного лидара практически равна нулю.

Режим сильной оптической турбулентности не сказывается на работе УОР-лидара столь драматично, как в случае когерентного лидара. Тем не менее максимальные интенсивности температурной турбулентности, реализовавшиеся на трассе зондирования во время эксперимента 16–17 июня 2017 г., позволили выявить ряд особенностей в поведении фактора усиления, не наблюдавшихся в проводившихся ранее экспериментах с УОР-лидаром при меньших интенсивностях турбулентности.

Поскольку в использованной в эксперименте модели лидара УОР-4 применяется одноканальная схема регистрации эффекта усиления обратного рассеяния вместо хорошо изученной ранее двухканальной схемы [9–12], были проведены расчеты отношения средних мощностей отраженного в турбулентной атмосфере лазерного излучения, принимаемых равными по площади центральной приосевой круглой и периферической кольцевой частей приемной апертуры $P = P(2a_2)/P(2a_1 - 2a_2)$. Методика компьютерного моделирования для этих расчетов представлена в [17]. Расчеты проводились для радиусов приосевой a_2 и внешней периферической кольцевой a_1 апертур, примерно равных радиусам приосевой и периферической апертур в лидаре УОР-4. Результаты показаны на рис. 5 в зависимости от параметра $\beta_0^2 = 1,23C_n^2(2\pi/\lambda)^{7/6}R^{11/6}$, представляющего собой рассчитанную в приближении Рытова дисперсию флуктуаций интенсивности плоской волны на трассе длиной R , λ — длина волны. Этим параметром удобно характеризовать интенсивность оптической турбулентности на атмосферных трассах. Для сравнения приведены результаты таких же расчетов для трассы удвоенной длины без отражения.

Из рис. 5 видно, что на трассе с отражением отношение мощностей осевой и периферической апертур превышает единицу вследствие корреляции прямой и обратной волн при всех задававшихся в расчетах значениях параметра β_0 .

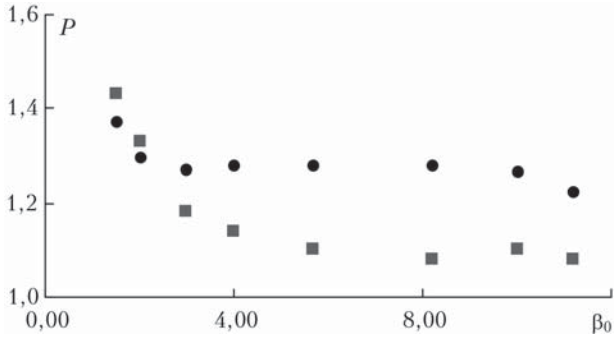


Рис. 5. Отношение средних мощностей $P = P(2a_2)/(2a_1 - 2a_2)$ отраженного (●) и прошедшего двойное расстояние в одном направлении (■) излучения в зависимости от параметра β_0 : $a_1 = 3$ см, $a_2 = 2,13$ см

На трассе удвоенной длины без отражения с увеличением интенсивности оптической турбулентности это отношение становится равным единице.

При слабой оптической турбулентности на трассе без отражения оно превышает единицу, так как при небольших значениях β_0 задававшийся в расчетах гауссов пучок еще сохраняет свою форму и основная мощность излучения сосредоточена в приосевой области. Таким образом, использование одноканального приема, пусть и не столь эффективно, как двухканальная схема, позволяет регистрировать усиление обратного рассеяния в турбулентной атмосфере.

На рис. 6 показаны профили коэффициента усиления вдоль трассы зондирования, зарегистрированные в течение 16 июня 2017 г. Эхосигнал для каждого профиля накапливался в течение 5 мин. В 07:00 после восхода солнца интенсивность турбулентности небольшая, поэтому на рис. 6, а профиль усиления монотонно растет до значения 1,4 на дистанции 2000 м. Через полчаса в 07:30 скорость нарастания N -фактора в ближней зоне увеличивается

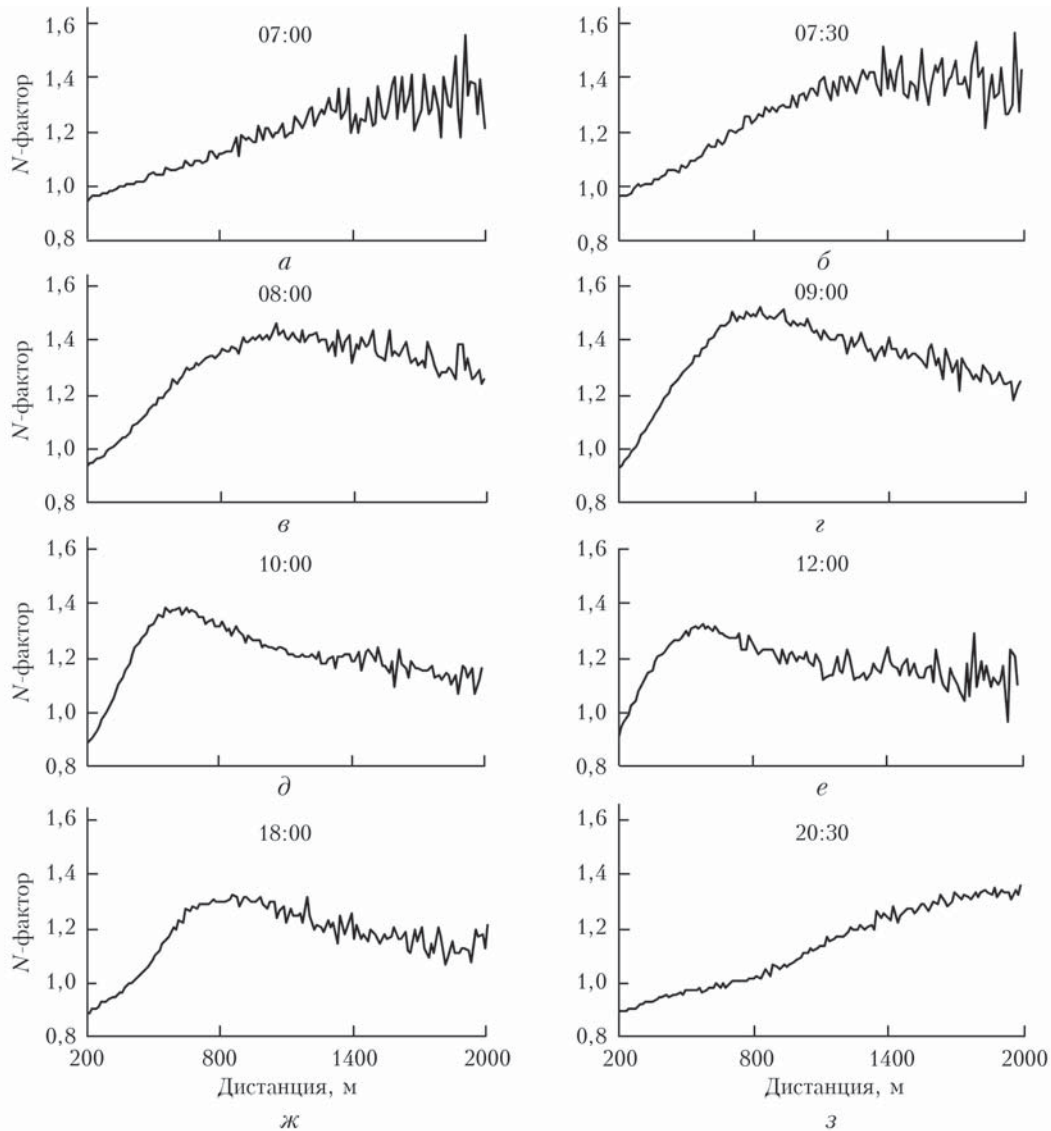


Рис. 6. Профили коэффициента усиления обратного рассеяния в направлении зондирования 16 июня 2017 г.

(рис. 6, б), так как турбулентность развивается и ее интенсивность растет. Однако начиная с дистанции 1200 м наблюдается насыщение коэффициента усиления на уровне 1,4. Далее на рис. 6, в скорость нарастания N -фактора в ближней зоне продолжает расти, но при этом после 1200 м наблюдается уменьшение коэффициента усиления.

В 09:00 на дистанции 800 м N -фактор достигает максимального значения 1,5 и после этого монотонно понижается до значения 1,25 на расстоянии 2000 м (рис. 6, г). В 10:00 скорость нарастания достигает максимального значения, а максимум N -фактора располагается на дистанции 600 м и после этого монотонно понижается до значения 1,15 на расстоянии 2000 м (рис. 6, д). В 12:00, когда интенсивность турбулентности возрастает еще больше и близка к максимальной величине, пиковое значение N -фактора становится равным всего лишь 1,3 (рис. 6, е). После 16:00 турбулентность постепенно затухает и процесс идет в обратном направлении (рис. 6, ж, з).

На рис. 7 приведен пример набора профилей коэффициента усиления за весь период измерений 16 и 17 июня. Для графика были отобраны профили, зарегистрировавшиеся в начале каждого часа. Кривые для коэффициента усиления представлены в зависимости от параметра β_0 . Полуширокой кривой показан результат усреднения по всему данному набору профилей.

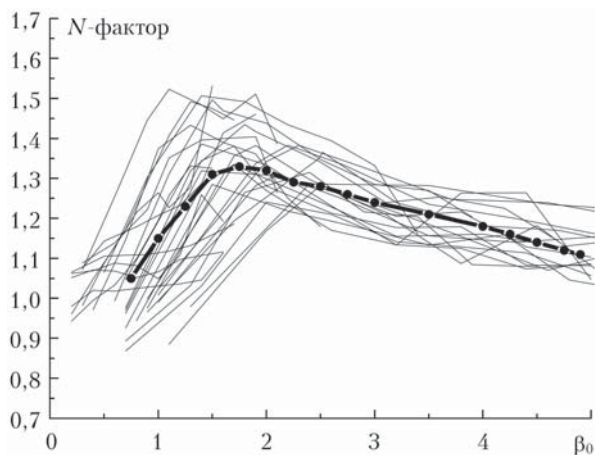


Рис. 7. Коэффициент усиления обратного рассеяния как функция параметра β_0

Видно, что, несмотря на значительный разброс, в среднем кривые параметризуются с помощью β_0 . С увеличением параметра β_0 коэффициент усиления сначала растет, достигая максимальных значений в диапазоне изменения β_0 от 1,5 до 2, затем постепенно убывает с дальнейшим увеличением интенсивности оптической турбулентности на трассе зондирования. Полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с теорией усиления мощности обратнорассеянного в атмосфере излучения для режима сильной оптической турбулентности [18].

Заключение

Таким образом, впервые на приземной трассе с контролем турбулентных условий распространения получены данные о вариациях коэффициента усиления средней мощности эхосигнала УОР-лидара в широком диапазоне изменения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха в атмосфере. Установлено, что с переходом в режим сильной оптической турбулентности на трассе зондирования коэффициент усиления обратного рассеяния в полном соответствии с теоретическими построениями насыщается на определенном уровне, а затем уменьшается по мере усиления оптической турбулентности. Максимальное значение коэффициента усиления, достижимое на заданном расстоянии, зависит от интенсивности оптической турбулентности в момент измерений.

Показано, что в среднем профили коэффициента усиления в направлении зондирования, полученные при различных значениях структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха, параметризуются с помощью обобщенного параметра β_0^2 , представляющего собой рассчитанную в приближении Рытова дисперсию флуктуаций интенсивности плоской волны. С увеличением параметра β_0 коэффициент усиления сначала растет, достигая максимальных значений в диапазоне изменения β_0 от 1,5 до 2, затем постепенно убывает с увеличением интенсивности оптической турбулентности на трассе зондирования. Временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния хорошо согласуется с временными изменениями структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха, определяемой из независимых измерений. Полученные результаты создают базу для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по определению условий применимости УОР-лидара для измерения интенсивности оптической турбулентности.

Авторы выражают глубокую благодарность И.А. Разенкову за предоставление результатов измерений с УОР-лидаром.

Работа выполнена по проекту РНФ № 14-17-00386-П.

1. Беленький М.С., Миронов В.Л. Лазерный метод определения параметра турбулентности C_n^2 , основанный на рассеянии света атмосферным аэрозолем // Изв. вуз. Радиофиз. 1981. Т. 24, № 3. С. 298–302.
2. Беленький М.С., Макаров А.А., Миронов В.Л., Показов В.В. Лидарные измерения структурной характеристики атмосферной турбулентности // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1984. Т. 20, № 4. С. 314–317.
3. Беленький М.С., Бороноев В.В., Гомбоев Н.Ц., Миронов В.Л. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. Новосибирск: Наука, 1986. 92 с.
4. Zilbermen A., Kopeika N.S. Lidar measurements of atmospheric turbulence profiles // Proc. SPIE. XVI Free Space Laser Commun. Technol. Bellingham, Washington, 2004. V. 5338. P. 288–297.

5. *Лидар*: Пат. на полезную модель 116245. Россия, МПК8, G 01 S 17/88, Гурвич А.С.; Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН; № 2011150933/28, Заявл. 15.12.2011; Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
6. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
7. Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // Изв. вуз. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
8. Афанасьев А.Л., Гурвич А.С., Ростов А.П. Экспериментальное исследование эффекта усиления обратного рассеяния в турбулентной атмосфере // XVIII Междунар. симпозиум. Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосфер. 2–6 июля 2012. Иркутск. Электронная версия докладов. С. С95–С99.
9. Банах В.А., Разенков И.А., Смалихо И.Н. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. I. Компьютерное моделирование // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 5–11.
10. Банах В.А., Разенков И.А. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. II. Конструкция и эксперимент // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 113–119.
11. Банах В.А., Разенков И.А. Лидарные измерения усиления обратного атмосферного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120, № 1. С. 339–348.
12. Banakh V.A., Razenkov I.A. Refractive turbulence strength estimation based on the laser echo signal amplification effect // Opt. Lett. 2016. V. 41, N 19. P. 4429–4432.
13. Воробьев В.В. О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. I. Уравнения // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 870–875; Vorob'ev V.V. On the applicability of asymptotic formulas of retrieving "optical" turbulence parameters from pulse lidar sounding data: I – equations // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 2. P. 156–161.
14. Воробьев В.В. О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. II. Результаты численного моделирования // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 987–993; Vorob'ev V.V. On the applicability of asymptotic formulas of retrieving "optical" turbulence parameters from pulse lidar sounding data: II – results of numerical simulation // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 2. P. 162–168.
15. Разенков И.А. Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48.
16. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А., Ростов А.П. Полигонные испытания пассивного оптического измерителя структурной характеристики показателя преломления [Электронный ресурс] // Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосфер.: материалы XXIII Междунар. симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. В118–В121. 1 CD-ROM.
17. Банах В.А., Герасимова Л.О. Усиление средней мощности обратного рассеянного плоским зеркалом излучения в режиме сильной оптической турбулентности [Электронный ресурс] // Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосферы: материалы XXIX Междунар. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. 1 CD-ROM.
18. Банах В.А. Усиление средней мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения в режиме сильной оптической турбулентности // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 857–862; Banakh V.A. Enhancement of the laser return mean power at the strong optical scintillation regime in a turbulent atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 2. P. 90–95.

V.A. Banakh, L.O. Gerasimova, I.V. Zaloznaya, A.V. Falits. Amplification of the lidar signal in a turbulent atmosphere under the conditions of strong optical scintillations.

Experimental data on the lidar signal amplification in a turbulent atmosphere in dependence on the structural constant of the turbulent fluctuations of the air refractive index are presented. It is established that as the refractive index structural constant increases, the amplification coefficient increases first, reaching a maximum, then decreases under the conditions of strong optical scintillations at a sounding path. The maximum of the amplification coefficient that is attainable at a given distance depends on the refractive index turbulence strength at the instant of measurement. The temporal variations in the backscatter amplification coefficient are in good agreement with the temporal changes in the magnitude of the refractive index structural constant, determined from independent measurements.