

Ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5

И.А. Разенков, А.И. Надеев, Н.Г. Зайцев, Е.В. Гордеев*

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

Поступила в редакцию 17.01.2020 г.

Дано описание ультрафиолетового (355 нм) безопасного для глаз турбулентного лидара УОР-5, предназначенного для исследования атмосферной турбулентности. Принцип работы лидара основан на эффекте увеличения обратного рассеяния, который возникает при двукратном распространении световой волны в случайной среде. В основе конструкции прибора приемо-передающий афокальный телескоп Мерсена, который обеспечивает термомеханическую стабильность при продолжительной работе лидара. Для уменьшения габаритов при изготовлении телескопа у главного зеркала были отрезаны края, которые в этой конструкции не используются. Были проведены испытания лидара в аэропорту Толмачево, во время которых осуществлялся непрерывный контроль турбулентности над взлетно-посадочной полосой и над стоянкой самолетов. Лидар уверенно регистрировал турбулентный след для любого типа самолета при взлете и посадке. Получено, что время жизни искусственной интенсивной турбулентной зоны над летным полем – 2–3 мин.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, искусственная турбулентность, увеличение обратного рассеяния, лидар; atmospheric turbulence, artificial turbulence, backscatter enhancement effect, lidar.

Введение

Турбулентность – характерное свойство атмосферы, когда имеют место случайные изменения температуры воздуха, давления, скорости и направления ветра. Турбулентность порождается рядом причин и может присутствовать на разном удалении от земли. При полете самолета турбулентность так же естественна, как качка для корабля на море. Сильная атмосферная турбулентность может представлять опасность как при взлете и посадке самолетов, так и во время полета на большой высоте. Поэтому создание новых средств контроля турбулентности остается актуальным.

К таким средствам дистанционного контроля атмосферной турбулентности можно отнести специализированный аэрозольный лазерный локалатор – турбулентный лидар [1–4]. Принцип его работы основан на эффекте увеличения среднего значения интенсивности обратного рассеяния (УОР), который возникает при двойном локационном распространении лазерного излучения в случайной среде [5, 6]. В основе работы такой системы лежит относительное изменение величин эхосигналов внутри узкого лазерного пучка и на некотором удалении от него, причем апертуры передатчика и приемников совпадают [3, 4]. Обязательное условие работы прибора – накопление сигнала, т.е. его временное усреднение по многим зондирующим импульсам.

Желательно, чтобы современная лазерная система была безопасной для глаз, компактной и надежной. Этим требованиям удовлетворяют микроимпульсные лазерные системы, в которых зондирующие импульсы имеют низкую энергию на уровне десятков мкДж. При этом частота следования световых импульсов, как правило, составляет несколько кГц, а средняя выходная мощность лазера – несколько сотен мВт при его небольших размерах. Обычно это твердотельные лазеры с непрерывной диодной накачкой, имеющие воздушное охлаждение и работающие в режиме модуляции добротности.

Ниже дано описание конструкции турбулентного лидара УОР-5, работающего на длине волны 355 нм. Лидар создан в Институте оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева. Испытание лидара проводилось на летном поле в аэропорту Толмачево г. Новосибирска. Целью эксперимента было исследование возможности дистанционного обнаружения искусственной турбулентности и оценка ее интенсивности в вихревом следе приземляющихся и взлетающих самолетов.

Выходным параметром турбулентного лидара является структурная характеристика «оптической» турбулентности C_n^2 , величина которой зависит от интенсивности турбулентности, в частности от величины флуктуаций температуры. Очевидно, что искусственная турбулентность вихревого следа самолета будет накладываться на естественную турбулентность, интенсивность которой зависит от температурного и ветрового режима в приземном слое атмосферы. Поэтому обнаружительная способность турбулентного лидара будет определяться как его конструкцией, так и соотношением интенсивностей

* Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru); Александр Иванович Надеев (nadeev@iao.ru); Николай Геннадьевич Зайцев (kolan317_1@mail.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru).

искусственной и естественной составляющих атмосферной турбулентности.

Решение обратной задачи восстановления параметра C_n^2 из данных зондирования представляет собой сложную математическую проблему, поскольку пространственный профиль эхосигнала турбулентного лидара связан с профилем C_n^2 интегральным уравнением [1, 7]. Сегодня точное решение обратной задачи для турбулентного лидара отсутствует. Для получения оценки \bar{C}_n^2 в [8] было предложено использовать приближение В.В. Воробьева [7], которое удовлетворительно описывает поведение эхосигнала для статистически однородной турбулентности. Основанием для этого послужило предположение о том, что эффект УОР возникает в относительно небольшой области пространства вблизи рассеивающего объема [8]. Данные турбулентного лидара, полученные в Толмачево в 2018 г., были обработаны по этой методике для решения задачи оценки интенсивности, размера и времени жизни вихревого следа самолета над взлетно-посадочной полосой.

1. Конструкция лидара

На момент создания ультрафиолетового лидара УОР-5 в начале 2018 г. нами уже был накоплен некоторый опыт изготовления такого рода приборов [4, 9]. Для повышения оптико-механической стабильности, которая необходима при проведении длительных непрерывных наблюдений, мы применили афокальный телескоп системы Мерсена, состоящий из пары параболических зеркал [10]. Телескоп одновременно работает на передачу светового импульса в атмосферу и на прием обраторассеянного излучения. Приемная часть лидара двухканальная. Один приемный канал – основной, он точно совмещен с передающим каналом и регистрирует вместе с обычным эхосигналом турбулентную добавку к эхосигналу за счет эффекта УОР. Второй приемный канал – дополнительный, он регистрирует

только обычный эхосигнал и используется для нормировки сигнала основного канала, чтобы исключить влияние изменения коэффициента обратного рассеяния и ослабление вдоль трассы зондирования.

На рис. 1 приведена оптическая схема лидара УОР-5 и его внешний вид. Лидар функционирует следующим образом. Лазер 1 генерирует короткий световой импульс, который расширяется линзовым коллиматором 2, 3. Излучение лазера имеет линейную поляризацию, перпендикулярную плоскости рисунка. Полуволновая пластинка 4 поворачивает плоскость поляризации на 90° , чтобы излучение с минимальными потерями прошло сквозь тонкопленочный поляризатор 5, затем плоскими зеркалами 6 и 7 оно направляется на телескоп Мерсена 9, 10. Четвертьволновая пластинка 8, установленная перед телескопом, превращает линейную поляризацию излучения в круговую.

Телескоп 9, 10 в лидаре состоит из пары параболических зеркал, представляет собой зеркальный расширитель (коллиматор) и выполняет двойную функцию: формирует зондирующий пучок 11 круглой формы и принимает эхосигналы 12 и 13 из атмосферы. Приемные апертуры телескопа располагаются симметрично относительно оси. На рис. 1, а приходящий пучок основного приемного канала 12 совмещен с зондирующим пучком 11, а дополнительный пучок 13 располагается симметрично относительно оси телескопа. Оба приходящих пучка 12 и 13 сужаются телескопом 9, 10, затем четвертьволновая пластинка 8 преобразует круговую поляризацию в линейную, но уже перпендикулярную плоскости рисунка. Далее зеркала 6 и 7 направляют пучки 12 и 13 на тонкопленочный поляризатор 5, от которого они отражаются и поступают в приемный блок. В приемном блоке находятся поворотное зеркало 14, фокусирующая линза 15, апертурная диафрагма 16, интерференционный светофильтр 17, фотодетекторы 18 и 19. Внешний вид лидара УОР-5 показан на рис. 1, б.

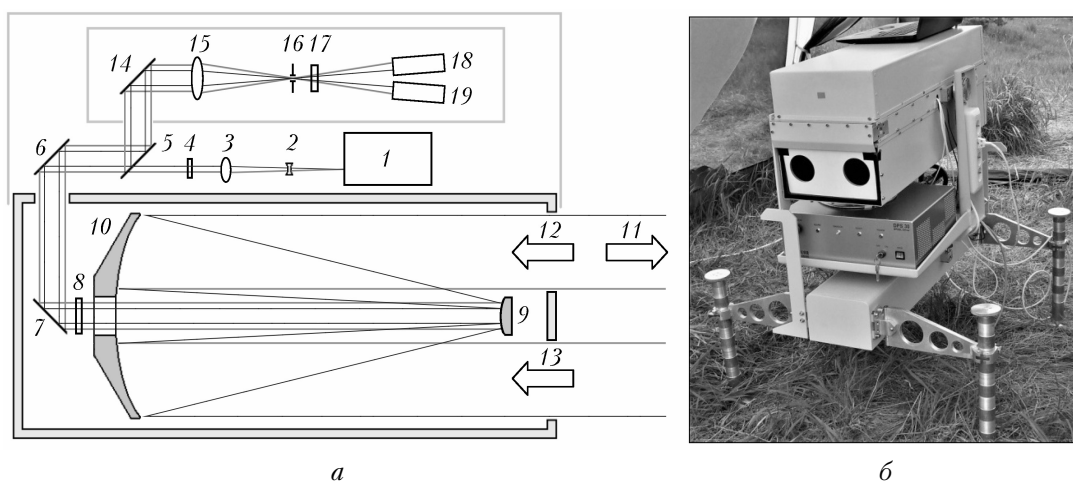


Рис. 1. Оптическая схема (а) и внешний вид (б) лидара УОР-5 (фотография во время эксперимента в аэропорту Толмачево в июле 2018 г.)

Приемо-передающий телескоп 9, 10 изготовлен в ИОА СО РАН из ситалла по специальной технологии с учетом специфики работы турбулентного лидара. Этот материал был выбран по причине низкого коэффициента температурного расширения для стабильной работы прибора при изменении температуры окружающего воздуха. Из схемы на рис. 1 следует, что у телескопа работают только две небольшие зоны, расположенные симметрично относительно оси. Поэтому у главного зеркала телескопа были симметрично отрезаны края, чтобы уменьшить габариты приемо-передатчика. Эта идея была предложена нами ранее [11] и реализована в настоящей работе. Заготовка для главного зеркала диаметром 260 мм до полировки была разрезана на три части. Затем все части были приклеены на специальный держатель, а после полировки на станке боковые куски стекла были убраны. В итоге главное зеркало телескопа по форме напоминает прямоугольник, у которого короткие стороны немного закругленные.

Габаритный размер главного зеркала телескопа — 260 мм × 110 мм. Увеличение телескопа составляет 12,5[×], его длина — 650 мм. Расстояние между осями приемных апертур — 150 мм, а их диаметр может быть от 50 до 100 мм в зависимости от установленного перед телескопом экрана с парой круглых отверстий. На рис. 1, б перед телескопом установлен экран с отверстиями диаметром 70 мм. Основные параметры лидара приведены в таблице. Заметим, что геометрические параметры приемопередатчика турбулентного лидара были выбраны исходя из расчетов [11], где также предлагалось использовать излучение с длиной волны 355 нм.

Основные параметры лидара

Параметр	Значение
<i>Передатчик</i>	
Лазер	Solar JX-330
Длина волны	355 нм
Длительность импульса	30 нс
Частота повторения	10 кГц
Мощность лазера	1 Вт
Энергия в импульсе	100 мкДж
Качество пучка	TEM ₀₀ , M ² < 1,2
Размер пучка	70 мм
Расходимость пучка	< 30 мкрад
<i>Приемник</i>	
Афокальный телескоп	Мерсен
Размер телескопа, мм	260 × 110 × 650
Увеличение телескопа	12,5 [×]
Число каналов	2, разнос 150 мм
Апертура приемника	70 мм
Поле зрения каналов	300 мкрад
Пространственное разрешение	15 м
Время накопления	от 15 с
Фотоприемник (ФЭУ)	33%

Основу оптической скамьи лидара составляют две алюминиевые пластины, которые были соединены между собой сотней алюминиевых втулок. Пространство между пластинами во время работы постоянно продувается пятью вентиляторами, установленными в задней части. Продувка и наличие

большого количества соединительных втулок позволяют выравнять температуру между верхним и нижним краями скамьи при возникновении температурного градиента, тем самым максимально уменьшая ее возможную деформацию. Ширина скамьи равна ширине телескопа, зеркала которого закреплены на нижней стороне скамьи. На верхней стороне размещены лазер, оптические элементы и приемный блок. Лазер охлаждается воздухом, который забирается из продуваемого канала внутри оптической скамьи и затем возвращается обратно. Целью такой оптимизации было создание компактного приемопередатчика с повышенной термомеханической стабильностью. Испытания прибора показали, что в целом идея оправдала себя.

В качестве фотоприемников 18 и 19 в лидаре используются фотоумножители (ФЭУ), а именно модули Hamamatsu H10682-210 для счета фотонов, имеющие квантовую эффективность 33% с учетом установленного порога дискриминатора. Мы разработали счетчик фотонов на базе ПЛИС Intel FPGA (MAX10) [12], который содержит четыре счетных канала с TTL входами и два входа для запуска — оптический и TTL. Каждый канал использует 8 Кбайт встроенной в ПЛИС памяти для сохранения эхосигналов с трассы зондирования. Обмен данными с компьютером реализован по интерфейсу USB 2.0. В счетчике есть возможность изменения длительности строба по дальности от 10 до 300 нс; запуск счетчика возможен в двух режимах — от стартовых импульсов с ожиданием заполнения всей памяти и от стартовых импульсов без ожидания заполнения.

2. Процедура обработки данных

Первичные данные турбулентного лидара представляют собой пары профилей эхосигналов основного и дополнительного приемных каналов, получаемые синхронно в течение заданного интервала времени. Если интервал накопления — 1 мин, а частота следования лазерных импульсов — 10 кГц, то общее количество выстрелов составит 0,6 млн. Размер строба можно выбирать, и, как правило, мы используем строб 100 нс, что соответствует пространственному разрешению 15 м.

Для турбулентного лидара требуется калибровка приемников, состоящая из нескольких этапов [3, 13]. Сначала необходимо определить последствие детекторов обоих каналов. Дело в том, что в момент посылки зондирующего импульса в атмосферу происходит паразитное рассеяние на тонкопленочном поляризаторе 5 (см. рис. 1, а). Это нежелательное интенсивное излучение попадает в приемный блок и ослепляет фотоприемники 18 и 19. Больше всего перегружается ФЭУ основного приемного канала 18, который реагирует на мощный короткий световой импульс случайным длительным импульсом последствием.

Для получения эхосигналов последствием перед началом каждого цикла записи производится регистрация сигналов при закрытом черным экраном выходе в атмосферу. Заметим, что это можно сделать

только один раз перед началом цикла, который может длиться несколько дней и дольше. При обработке сигналы последствия вычитаются из атмосферных эхосигналов. Нелинейность фотодетекторов корректируется с помощью известного соотношения [14].

Другая важная часть калибровки турбулентного лидара – определение относительной чувствительности приемных каналов. Ранее мы поступали следующим образом. Сначала анализировалась запись данных за сутки или больше и определялся момент времени, когда отношение сигналов основного и дополнительного приемных каналов было минимальным. При этом полагалось, что имела место очень слабая атмосферная турбулентность. При обработке данных для калибровки чувствительности каналов использовался профиль отношения эхосигналов, который одновременно учитывал как неидентичность геометрических функций приемных каналов, так и разную чувствительность фотодетекторов [3, 13].

Однако на больших дистанциях даже слабая турбулентность может существенно повлиять на отношение эхосигналов. Поэтому в настоящее время мы поступаем иначе, полагая, что при правильной настройке и последующей стабильной работе системы геометрия лидара остается неизменной и начиная с некоторого расстояния (~1 км) геометрические функции приемных каналов остаются постоянными. Тогда в условиях чистой атмосферы, чтобы исключить многократное рассеяние, и при невысоком уровне интенсивности турбулентности определяется минимальное значение отношения эхосигналов на расстоянии ~1 км от лидара. В идеальном случае это отношение равно единице, а в действительности оно отличается от единицы не более чем на 50%. В расчетах это отношение считается постоянным по всей трассе, за исключением начального отрезка, который в зависимости от настройки осей приемопередатчика составляет от 0,8 до 1,5 км и где отношение сигналов с необходимой точностью аппроксимируется степенным полиномом.

Обработка данных производилась по формуле [7, 8]:

$$\tilde{C}_n^2 = \frac{\tilde{q}(x) \left[1 + 0,4 \left(R^2 / r_F^2(x) \right) \right]^{7/6}}{0,49 k_0^{7/6} x^{11/6}}, \quad (1)$$

где \tilde{C}_n^2 – лидарная оценка структурной характеристики C_n^2 ; $\tilde{q}(x)$ – фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного излучения на приемнике, определяемый из отношения эхосигналов основного и дополнительного приемных каналов; x – расстояние от лидара; R – радиус апертур; $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; $r_F(x) = \sqrt{x/k_0}$ – масштаб Френеля. Формула (1) не является точным решением обратной задачи, но позволяет получить оценку C_n^2 [7]. Значок «тильда» в формуле (1) указывает на экспериментальные данные, далее мы его будем опускать.

3. Испытание лидара в аэропорту Толмачево

В середине июля 2018 г. на летном поле аэропорта Толмачево в г. Новосибирске проводился комплексный эксперимент по исследованию турбулентности, в котором использовали турбулентный лидар УОР-5, пассивный оптический измеритель скорости ветра [15], ветровой когерентный лидар Stream Line [16] и акустические анемометры [17]. На рис. 2 показан снимок взлетно-посадочной полосы (ВПП) и трасса турбулентного лидара, которая под углом 9,5° пересекала ВПП примерно в том месте, где приземлялись самолеты. Расстояние от лидара до точки пересечения – 2 км. Ветровой лидар находился на удалении 150 м к северу от УОР-5 и производил сканирование в плоскости, перпендикулярной ВПП [16]. Здесь же работал пассивный оптический измеритель [15], а в стороне стояли мачты с анемометрами [17].



Рис. 2. Карта аэропорта Толмачево; прямая – трасса лидара УОР-5 во время эксперимента в июле 2018 г.

На рис. 3 приведен пример данных лидара УОР-5, записанных через 3 мин после приземления самолета А319. Время накопления эхосигналов — 1 мин, пространственное разрешение — 15 м. Был слабый восточный ветер ~ 1 м/с, самолеты заходили на посадку с западного направления. На рис. 3, *а* приведены скорректированные на квадрат расстояния эхосигналы основного и дополнительного приемных каналов. По основному эхосигналу видно, что после приземления самолета лидар фиксировал повышение интенсивности турбулентности над ВПП на удалении 1,7 км от лидара. Кроме того, на расстоянии от 3,5 до 4,5 км видно зону повышенной интенсивности турбулентности, которая, вероятно, формировалась в результате активности на стоянке самолетов и при рулении.

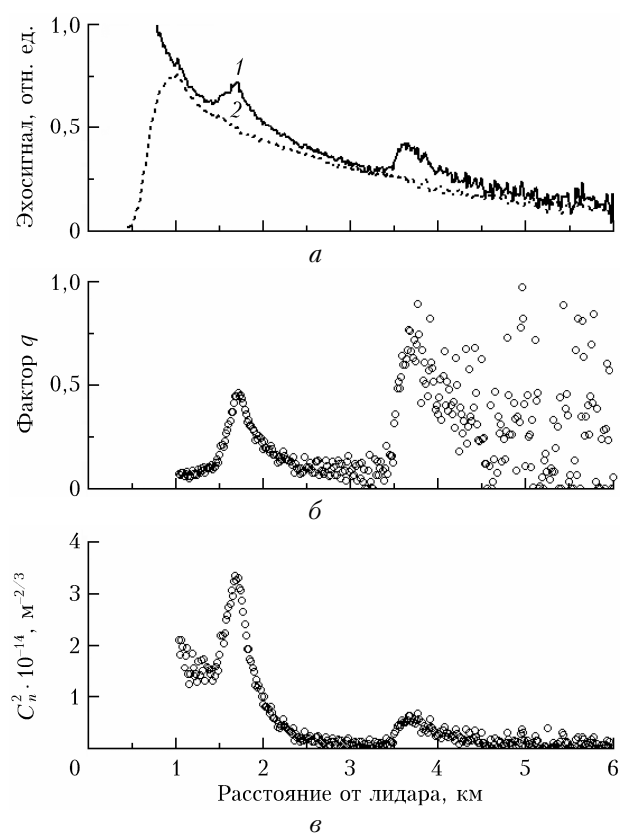


Рис. 3. Скорректированные на квадрат расстояния эхосигналы основного (кривая 1) и дополнительного (кривая 2) приемных каналов (*а*); фактор $q(x)$ (*б*); оценка параметра C_n^2 (*в*); запись через 2 мин после приземления самолета А319 14 июля 2018 г., 07:22 (время местное)

Фактор $q(x)$, полученный из отношения эхосигналов, приведен на рис. 3, *б*, рассчитанная из $q(x)$ по формуле (1) оценка параметра C_n^2 — на рис. 3, *в*.

Фоновое значение параметра C_n^2 на расстоянии 3 км от лидара было на уровне $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, первый максимум ($3,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$) был зафиксирован на расстоянии 1,7 км, второй ($7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$) — на расстоянии 3,7 км от лидара. Величина первого пика над ВПП после вычитания фонового значения составила $34 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, а второго пика, на стоянке

самолетов, — $6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. Получается, что интенсивность турбулентности после приземления самолета была почти в 6 раз выше, чем над стоянкой.

4. Результаты наблюдений

Вышеописанный эксперимент на летном поле проводился нами впервые. Сначала пробовали делать измерения в разных направлениях, в том числе и в направлении на запад, навстречу заходящим на посадку самолетам. При этом было проблематично точно навести трассу зондирования на глиссаду. К тому же не было уверенности, что удастся получить устойчивый сигнал от турбулентного (спутного) следа самолета. В начале эксперимента, днем 13 июля и в ночь на 14 июля 2018 г., шел дождь и временами был сильный туман. Утром 14 июля погода наладилась, и нам удалось получить непрерывную запись в течение нескольких часов, пока уровень естественной турбулентности не был высоким, а самолеты совершали взлеты и посадки регулярно.

На рис. 4, *а* показано пространственно-временное распределение интенсивности турбулентности над ВПП и стоянкой самолетов в период от 07:00 до 11:00. Повышенная интенсивность турбулентности над стоянкой на удалении от лидара начиная с 3,5 км наблюдалась постоянно, а на удалении ~ 2 км — эпизодически во время приземления и взлета машин. Утром была низкая облачность, которая к обеду постепенно ослабевала. С 10:20 наблюдалось усиление турбулентности. Уровень фоновой засветки на рис. 4, *б* отмечен светло-серым, он определялся по уровню эхосигнала на большом удалении от лидара в конце трассы зондирования. Темный ступенчатый график на рис. 4, *б* показывает временной профиль C_n^2 на расстоянии 1750 м от лидара. Пики указывают на моменты посадки и взлета самолетов, а их амплитуда — на интенсивность турбулентности, которая зависела от типа самолета и места приземления. Расстояние от места приземления до лидара, судя по черному следу от резины на ВПП (см. рис. 2), могло изменяться от 1,2 до 2 км. Длина ВПП в аэропорту Толмачево 3,5 км.

На рис. 5 приведены снимки захода на посадку и момента приземления грузового лайнера MD-11F. На рис. 5, *б* видно искусственное облако дыма, которое возникло сразу после касания ВПП.

Динамика изменения эхосигналов и оценки интенсивности турбулентности показаны на рис. 6. Здесь шесть пар эхосигналов (слева) и шесть профилей параметра C_n^2 (справа). Первая запись получена в 08:09 до приземления MD-11F, и на ней в интервале расстояний от 1–2 км прослеживается остаточная турбулентность от приземления предыдущей машины в 08:05. Также наблюдается турбулентность над самолетной стоянкой на дистанции 4–5 км.

В момент приземления лайнера (08:10) на эхосигнале появился острый пик от искусственного облака, возникшего от горячей резины шасси после касания бетона. В это время наблюдается едва заметное

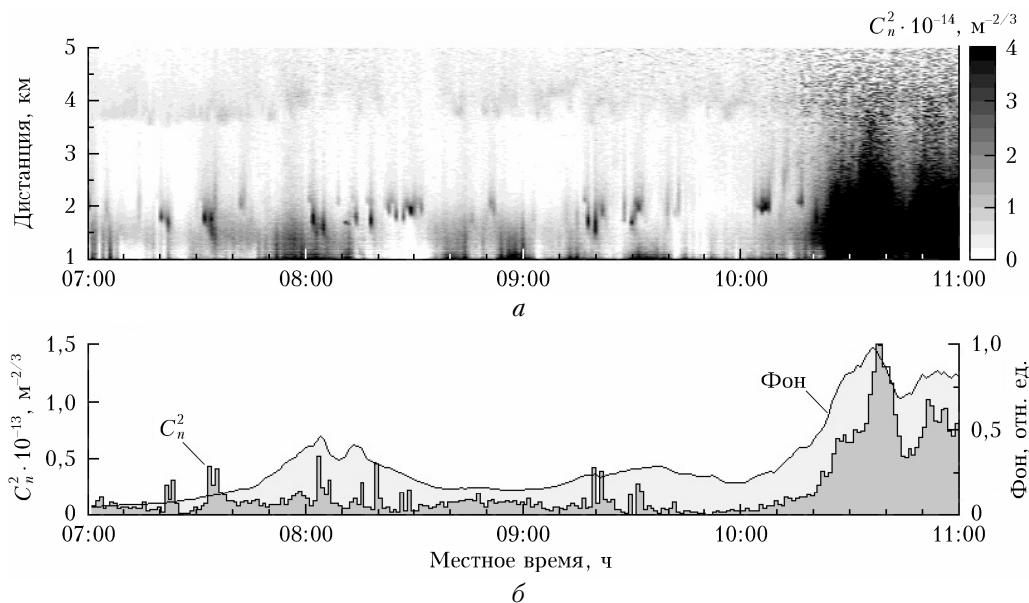


Рис. 4. Пространственно-временное распределение интенсивности турбулентности над ВПП (а); изменение параметра C_n^2 (б) на расстоянии 1750 м от лидара (14 июля 2018 г.)

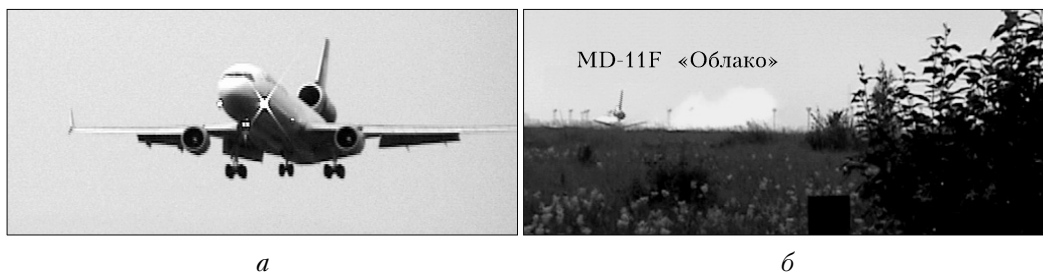


Рис. 5. Заход на посадку грузового лайнера MD-11F (а) в Толмачево 14 июля 2018 г. в 08:09 (время местное); момент приземления (б), видно искусственное облако аэрозоля от горящей резины колес

повышение C_n^2 на расстоянии 1,7 км от лидара. Еще через минуту (08:11) виден рост интенсивности турбулентности как в облаке дыма, так и дальше по дистанции начиная с 2 км, где произошло автоматическое переключение двигателей в режим реверса после приземления.

Затем (08:12) на экосигнале наблюдается расширение аэрозольного облака и его снос ветром в сторону лидара. Интенсивность турбулентности при этом существенно не изменилась. Еще через минуту (08:13) имеет место максимум $C_n^2 \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ на расстоянии ~ 2 км, который, возможно, появился в результате сноса ветром основной зоны турбулентности, возникшей в результате торможения, дальше от места пересечения трассы зондирования с ВПП. Можно предположить, что если бы трасса зондирования пересекала ВПП дальше, то на предыдущем графике величина пика параметра C_n^2 была бы больше. На последней паре графиков (08:14) наблюдается резкое понижение C_n^2 и возврат в прежнее состояние, которое было до посадки MD-11F. Аэрозольное облако продолжило движение на запад в сторону лидара, причем интенсивность турбулентности в нем была уже на уровне фона.

На этом примере отчетливо видно, что время жизни искусственной интенсивной турбулентной зоны над ВПП составляет 2–3 мин. Очевидно, что при посадке лайнера процесс появления и исчезновения турбулентной зоны нестационарный. В эксперименте одно измерение занимало 1 мин, поэтому можно предположить, что полученные оценки C_n^2 занижены. Тем не менее они корректно отражают динамику турбулентности над взлетно-посадочной полосой.

На рис. 7 представлены данные до и после взлета самолетов в разных направлениях, записанные 14 июля 2018 г. Направление взлета относительно лидара показано стрелками. Крестиками обозначен профиль в 06:53, который имел место за 2 мин до взлета B747-8F. Заметим, что еще раньше, в 06:51, приземлился другой самолет, поэтому имела место остаточная искусственная турбулентность на уровне $\sim 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. B747-8F взлетал в западном направлении в 06:55, максимум интенсивности турбулентности наблюдался на расстоянии 1,6 км.

Еще через 2 мин взлетал A320 на восток. По форме пик похож на предыдущий, но он сдвинут на 400 м, а его интенсивность равна $\sim 4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$.

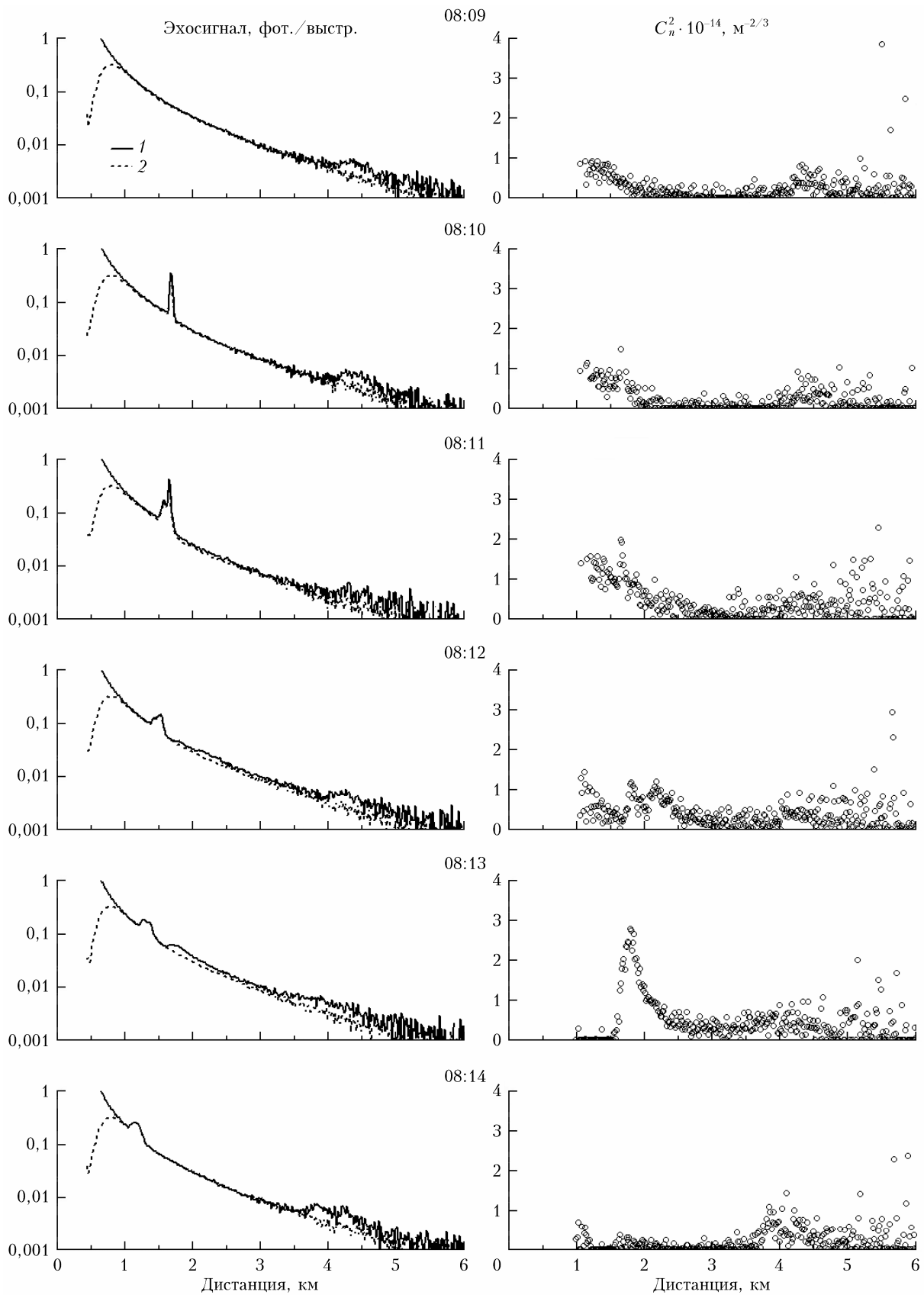


Рис. 6. Эхосигналы основного (кривая 1) и дополнительного (кривая 2) приемных каналов (слева); оценка параметра C_n^2 (справа); проводится запись в течение 6 мин, начинается за 1 мин до приземления MD-11F (14 июля 2018 г.)

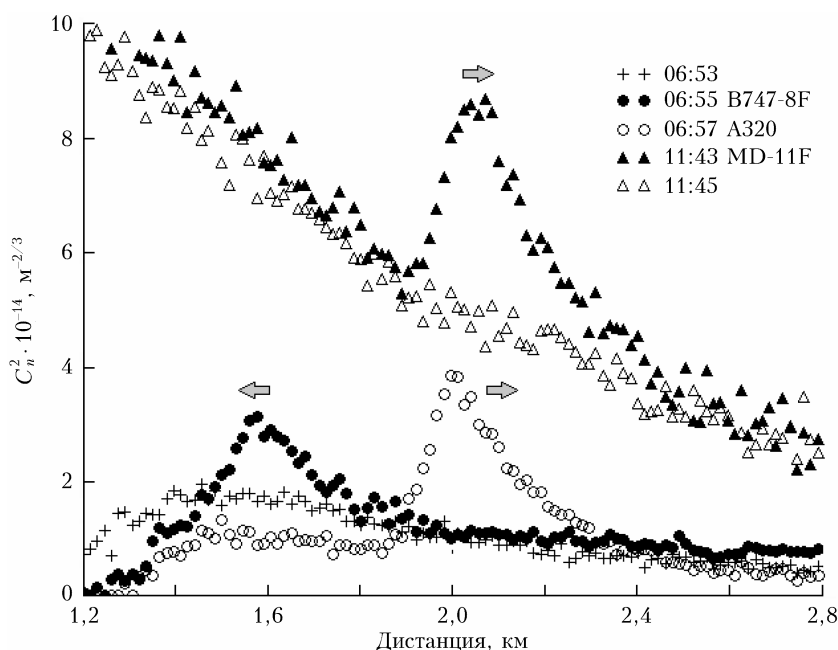


Рис. 7. Оценки параметра C_n^2 : + — за 2 мин до взлета B747-8F; ● — взлет B747-8F навстречу направлению зондирования; ○ — взлет A320 по направлению зондирования; ▲ — взлет MD-11F по направлению зондирования; △ — через 2 мин после взлета MD-11F (работа лидара УОР-5 в аэропорту Толмачево 14 июля 2018 г., время местное)

Поперечная скорость ветра в это время была равна нулю, а продольная — приблизительно 1 м/с (см. [16]). Форма всех пиков немного ассиметричная, так как спадающая часть профиля C_n^2 в 1,5–2 раза больше передней нарастающей части, равной 100 м. Мы вправе полагать, что искусственная турбулентная зона за самолетом возникает над ВПП. Лидарная трасса пересекает искусственную турбулентную полосу под углом $9,5^\circ$, тогда, если ширина пика C_n^2 примерно равна 300 м, определяем, что ширина турбулентной зоны за самолетом $300 \text{ м} \times \sin(9,5^\circ) \approx 50 \text{ м}$, т.е. совпадает с размахом крыльев самолета.

На рис. 7 также приведены околополуденный профиль параметра C_n^2 во время взлета MD-11F и профиль через 2 мин после его взлета. Поперечная скорость ветра относительно трассы зондирования была направлена на юг ($\sim 2 \text{ м/с}$), а продольная — на запад ($\sim 3 \text{ м/с}$). Ветер с северо-востока способствовал тому, чтобы передний фронт пика C_n^2 был круче, чем задний, так как происходило замещение воздушной массы с низким уровнем C_n^2 перед лидаром на массу воздуха с высокой интенсивностью турбулентности. Ширина пика в 11:43 больше примерно на 100 м, что вполне согласуется с величиной продольной скорости ветра, который за 2 мин перемещает турбулентную зону на 100–150 м. Полученный искусственный пик (черные треугольники) накладывается на фоновую турбулентность, величина которой даже превышала величину пика в 06:57 (светлые кружки). Это обстоятельство ограничивает возможности лидара по обнаружению зон средней интенсивности турбулентности при наличии развитой естественной турбулентности.

Заключение

Создан компактный микроимпульсный безопасный для глаз турбулентный лидар, принцип работы которого основан на эффекте увеличения обратного рассеяния. Лазерное излучение прибора — невидимое глазом (355 нм), что позволяет его использовать при проведении наблюдений в местах, где желательно не создавать помехи работающему персоналу и другой аппаратуре.

Испытание лидара проводилось в июле 2018 г. на летном поле аэропорта Толмачево в г. Новосибирске. Лидар уверенно регистрировал интенсивность искусственной турбулентности над ВПП во время приземления и взлета самолетов. Временной интервал существования интенсивного турбулентного следа самолетов составлял 2–3 мин. При этом постоянно фиксировалась повышенная интенсивность турбулентности на стоянке самолетов при рулении и запуске двигателей.

В утренние часы фоновое значение структурной характеристики C_n^2 было на уровне $10^{-16} - 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, а пиковые значения параметра C_n^2 при взлете и посадке самолетов достигали $5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Возможно, что полученные оценки интенсивности турбулентности были заниженными, так как наблюдение производилось за быстропротекающими нестационарными процессами, а время одного измерения составляло 1 мин. В районе полудня усиление фоновой турбулентности уже затрудняло идентификацию пиков искусственной турбулентности при взлетах и приземлениях самолетов.

Работа в аэропорту Толмачево позволила получить объективную информацию о работоспособности

и возможностях ультрафиолетового турбулентного лидара УОР-5, который представляет собой новый тип аэрозольного лазерного локалятора для оперативного дистанционного контроля за атмосферной турбулентностью.

Авторы выражают глубокую признательность нашим оптикам — братьям Олегу Альбертовичу и Константину Альбертовичу Рынковым. Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований РАН № АААА-А17-117021310149-4.

1. *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.
2. *Гурвич А.С.* Лидарное позиционирование областей повышенной турбулентности ясного неба // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50, № 2. С. 166–174.
3. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48; *Razenkov I.A.* Turbulent lidar: I – Design // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 273–280.
4. *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.
5. *Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров С.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* «Закономерность увеличения обратного рассеяния волн». Свидетельство на открытие № 359. Приоритет открытия: 25 августа 1972 г. в части теоретического обоснования и 12 августа 1976 г. в части экспериментального доказательства закономерности. Государственный реестр открытий СССР // Бюлл. изобретений. 1989. № 21.
6. *Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // Изв. вузов. Радиофиз. 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
7. *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.
8. *Разенков И.А.* Оценка интенсивности турбулентности из лидарных данных // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 1. С. 32–40.
9. *Razenkov I.A., Banakh V.A., Gordeev E.V.* Lidar “BSE-4” for the atmospheric turbulence measurements // Proc. SPIE. 2018. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2505183> (last access: 9.11.2019).
10. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. М.: Наука, 1976. 512 с.
11. *Разенков И.А.* Оптимизация параметров турбулентного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 70–81; *Razenkov I.A.* Optimization of parameters of a turbulent lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 3. P. 349–360.
12. *Зайцев Н.Г., Надеев А.И.* Программно-аппаратный комплекс многоканальной регистрации и обработки потока одноэлектронных импульсов // Журн. радиоэлектрон. 2012. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/9/text.pdf> (last access: 17.12.2019).
13. *Банах В.А., Разенков И.А.* Лидарные измерения усиления обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120, № 2. С. 339–348.
14. *Donovan D.P., Whiteway J.A., Carswell A.I.* Correction for nonlinear photon-counting effects in lidar systems // Appl. Opt. 1993. V. 32, N 33. P. 6742–6753.
15. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А.* Мониторинг ветровой обстановки и индикация спутных следов в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта пассивным оптическим методом // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 365–370; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A.* Passive optical monitoring of wind conditions and indication of aircraft wakes near airport runways // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 506–510.
16. *Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В., Сухарев А.А.* Эксперимент с целью изучения вихревых следов самолетов, проведенный на летном поле аэропорта Толмачево в 2018 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 8. С. 609–619.
17. *Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Аппаратно-программный комплекс для исследования структуры полей турбулентных флуктуаций температуры и ветра // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 378–384; *Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Hardware-software complex for studying the structure of the fields of temperature and turbulent wind fluctuations // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 479–485.

I.A. Razenkov, A.I. Nadeev, N.G. Zaitsev, E.V. Gordeev. Turbulent UV lidar BSE-5.

The UV (355 nm) eye-safe turbulent lidar BSE-5 designed for atmospheric turbulence studies is described. Lidar works on the effect of backscattering enhancement, which occurs when a light wave propagates twice in a random medium. The design of the device is based on the receiving and transmitting afocal Mersenne telescope, which provides thermomechanical stability during long-term operation of the device. To reduce the size of the telescope, the edges of the main mirror were cut off, which are not used during the lidar operation. Lidar tests were conducted at Tolmachevo airport, during which the turbulence condition was continuously monitored over the runway and over the aircraft parking. The lidar confidently recorded a turbulent wake for any aircraft type during takeoff and landing. It was found that the track width is 50 m wide, and the lifetime of the intense artificial turbulent zone over the airfield is 2–3 minutes.