

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 532.5.013

Исследование влияния очага природного пожара на локальные характеристики атмосферы с применением дистанционных методов зондирования

Е.Л. Лобода^{1,2}, И.А. Разенков², М.В. Агафонцев^{1,2}, В.В. Рейно^{2*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 20.03.2024;
после доработки 27.04.2024;
принята к печати 22.05.2024

Представлены результаты дистанционного зондирования дымового шлейфа над модельным очагом природного пожара с использованием специализированного лидара, принцип работы которого основан на эффекте увеличения обратного рассеяния, регистрирующего оптическую турбулентность. Расстояние до очага горения составляло 1600 м, площадь модельного пожара варьировалась: 1, 9 и 25 м². Установлено, что во время горения лидар фиксировал повышение эхосигнала в основном приемном канале, регистрирующем аэрозольное рассеяние и турбулентную компоненту, относительно эхосигнала в дополнительном приемном канале, регистрирующем только аэрозоль. Ширина дымового шлейфа не превышала 20 м, повышение основного эхосигнала наблюдалось сразу за шлейфом в интервале расстояний от 0 до 600 м. В данном эксперименте шлейф теплого дыма действовал как фазовый экран, который изменял когерентную структуру лазерного пучка. После завершения интенсивного горения температура внутри шлейфа быстро понижалась и лидар фиксировал только содержание аэрозоля. Появление аэрозольной и турбулентной составляющей в эхосигнале, отражающих повышение концентрации аэрозоля и интенсивности турбулентности, однозначно указывает на очаг горения. Проведено сравнение лидарной оценки значений структурной характеристики показателя преломления C_n^2 на высоте 10 м над очагом горения с данными ультразвуковой метеостанции АМК-03 на высоте 3 м и результатами моделирования низового природного пожара, опубликованными ранее. Применение турбулентного лидара является перспективным способом обнаружения малых очагов горения, в том числе бездымного или с низким выбросом конденсированных продуктов горения.

Ключевые слова: природный пожар, горение, лидар, турбулентность, аэрозоль; wildfire, combustion, lidar, turbulence, aerosol.

Введение

Атмосферная турбулентность — один из ключевых аспектов изучения атмосферы и ее взаимодействия с окружающей средой. Она влияет на теплообмен и циркуляцию в атмосфере, на перемешивание газовых компонентов атмосферы и перенос аэрозолей. Для изучения атмосферной турбулентности используются ультразвуковые метеостанции [1–3], а также различные оптические методы, в том числе с применением лидаров [4–7].

В работе [8] отмечено, что при природных пожарах происходит значительное изменение атмосферной турбулентности. Пожары вызывают интен-

сивный нагрев воздуха, что, в свою очередь, приводит к вертикальному движению воздушных масс. Происходит выброс в атмосферу большого объема конденсированных продуктов горения в виде пепла и сажи, что повышает концентрации вредных веществ в воздухе и влияет на здоровье людей и экосистемы в целом [8]. В работах проф. А.М. Гришина [9, 10] отмечается, что в результате природного пожара над очагом горения формируются термики с внутренней циркуляцией объемов воздуха, характерные размеры которых в вертикальной плоскости могут превышать 10 м. Такие термики можно рассматривать как крупномасштабную турбулентность. В [11] экспериментально показано, что в результате модельного природного пожара в окрестности очага горения на высотах до 10 м формируются турбулентные структуры масштабами 0,07–4,5 м, которые влияют на структурную характеристику показателя преломления C_n^2 . Следует об-

* Егор Леонидович Лобода (loboda@mail.tsu.ru); Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru); Михаил Владимирович Агафонцев (amv@mail.tsu.ru); Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru).

рратить внимание, что представленные в [11] результаты получены в непосредственной близости от фронта горения, но технической возможности измерить характеристики турбулентности непосредственно над фронтом (в конвективной колонке) у авторов работы не было. Также необходимо отметить, что в результате природных пожаров происходит изменение газового состава атмосферы [11], особенно если горят большие площади лесов или торфяников, в продуктах горения которых содержится большое количество углерода, закиси азота и сернистого газа.

Цель работы — эмпирическое исследование возможности применения турбулентного лидара для обнаружения малых очагов пожара, что позволит регистрировать их на ранних стадиях.

Лидар восприимчив к турбулентным флуктуациям показателя преломления воздуха, которые, в свою очередь, зависят от дисперсии флуктуаций температуры. Возникает вопрос: какова степень чувствительности лидара, когда зондирование осуществляется непосредственно над очагом модельного низового пожара.

Материалы и методы

Эксперимент проводился в окрестности аэродрома ДОСААФ в д. Головино Томской области. Для уменьшения влияния естественной турбулентности в атмосфере измерения проходили в вечернее время с 20:55 до 21:55 14.09.2023 г. при скорости ветра менее 1 м/с и устойчивой температурной стратификации. Температура окружающего воздуха составляла 8 °С, относительная влажность воздуха — 96%, абсолютная — 8,5 г/м³. В эксперименте использовался растительный горючий материал (РГМ) — сено, общей массой 60 кг. Были проведены три эксперимента с различными размерами очага горения и запасом топлива и выделенной энергией: 1,0 × 1,0 м (запас топлива — 1,5 кг/м², выделенная энергия — около 27 МДж, время загорания 21:02), 3,0 × 3,0 м (запас топлива — 1,4 кг/м², выделенная энергия — около 226 МДж, время загорания 21:13:30), 5,0 × 5,0 м (запас топлива — 1,83 кг/м², выделенная энергия — около 823 МДж, время загорания 21:28).

В непосредственной близости от очага горения метеопараметры регистрировались ультразвуковой метеостанцией АМК-03 с частотой регистрации 10 Гц на высоте 3 м. На открытой трассе на расстоянии ~ 1,6 км от модельного очага горения размещался ультрафиолетовый (355 нм) турбулентный лидар УОР-5, принцип работы которого основан на эффекте увеличения обратного рассеяния (УОР) [12–14]. Лидар относится к классу безопасных для глаз микроимпульсных лазерных систем. От других подобных систем наш лидар отличается тем, что в нем два принимающих канала, причем один из них совмещен с передающим [15]. Все каналы проходят через афокальный телескоп, поэтому конст-

рукция системы термомеханически стабильная, что позволяет ей длительное время работать в автоматическом режиме. Подробное описание турбулентного лидара УОР-5 дано в [16].

Первичные данные, полученные при измерениях лидаром, представлены парой эхосигналов. Первый эхосигнал P_a — это сумма обратного рассеяния от молекул и атмосферного аэрозоля. Второй эхосигнал P_{a+t} — сумма сигнала P_a и некоторой турбулентной добавки P_t , величина которой пропорциональна интенсивности оптической турбулентности. Из отношения эхосигналов лидара можно получить оценку C_n^2 . Показатель преломления воздуха связан с температурой воздуха, поэтому флуктуации коэффициента преломления обусловлены флуктуациями температуры и существует зависимость между C_n^2 и структурной характеристикой температуры C_T^2 [17].

Из отношения эхосигналов P_{a+t} и P_a лидара определяется фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного света на приемнике

$$q(x) = \frac{P_{a+t}(x)}{P_a(x)} - 1, \quad (1)$$

где x — расстояние от лидара до исследуемого объема в атмосфере. Функция $q(x)$ позволяет восстановить структурную характеристику показателя преломления:

$$C_n^2(x) = \frac{q(x) \left[1 + 0,4 \frac{r^2}{r_F^2(x)} \right]^{7/6}}{3,0 k_0^{7/6} x^{11/6}}, \quad (2)$$

где r — радиус приемной апертуры; $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны излучения лазера; $r_F(x) = \sqrt{x/k_0}$ — масштаб Френеля. Формула (2) является приближением для статистически однородной турбулентности, но мы вынуждены ее использовать, поскольку точного решения задачи обращения данных турбулентного лидара сегодня нет.

Результаты и обсуждение

Во время эксперимента в окрестности очага горения регистрировались рост температуры воздуха (не более чем на 1 К), увеличение вертикальной компоненты скорости ветра (не более чем на 0,1 м/с) и др. Аналогичные явления фиксировались в других модельных экспериментах по исследованию природных пожаров [11].

Рис. 1, а иллюстрирует пространственно-временное распределение эхосигнала P_a , которое дает наглядное представление о времени появления и плотности аэрозольного шлейфа при горении. Трасса лидара была почти горизонтальная и направлена на источник, который располагался на удалении 1600 м. Лазерное излучение лидара (355 нм)

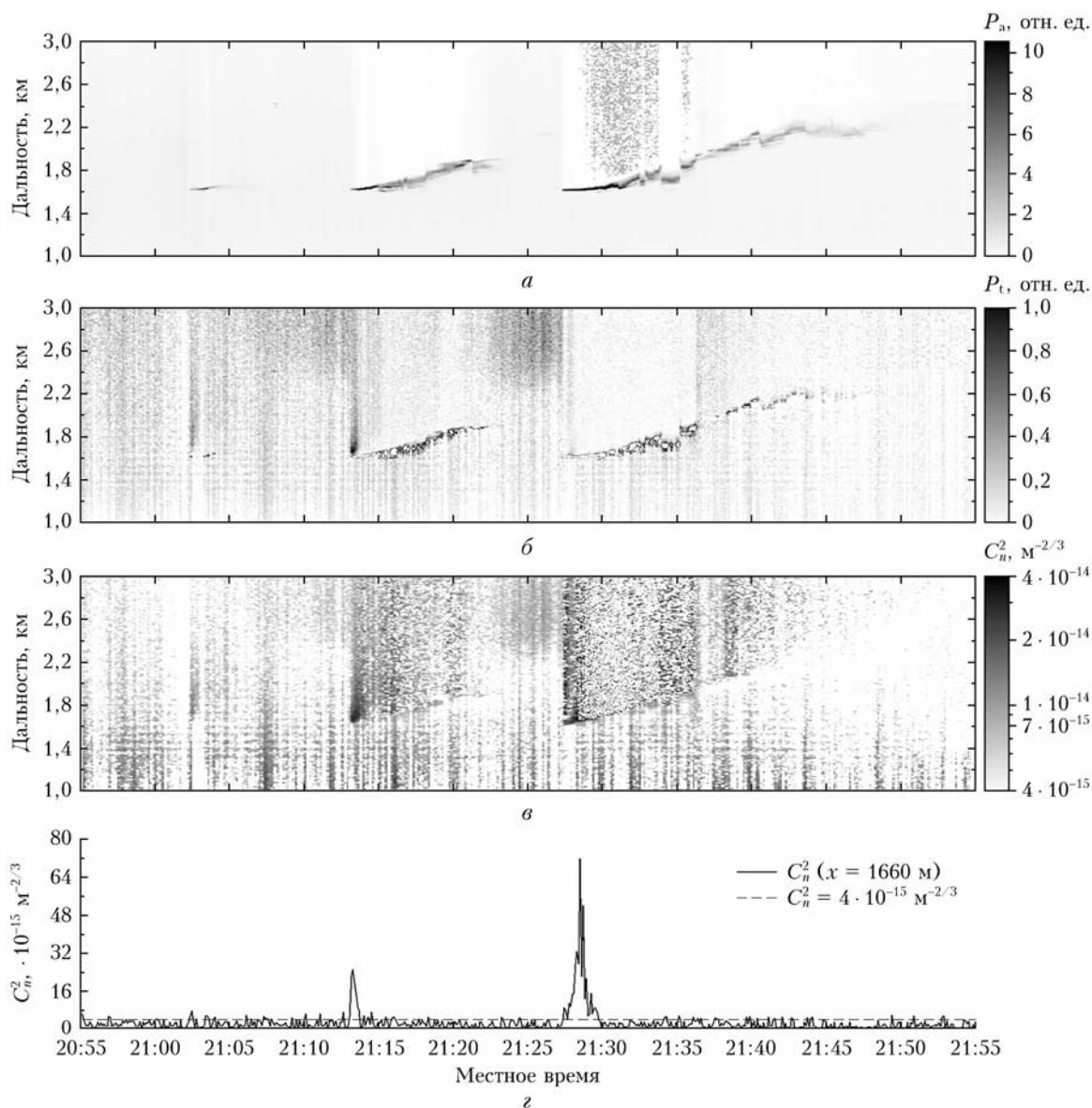


Рис. 1. Пространственно-временные распределения: эхосигнала P_a аэрозольного приемного канала (а); разности эхосигналов в приемных каналах $P_t = P_a - P_{a+t}$ (б); параметра C_n^2 (в); временной график C_n^2 на дистанции 1660 м (г). Лидар УОР-5, 14.09.2023 г.

глазом невидимое, поэтому точное положение трассы зондирования нам неизвестно. Предположительно, высота трассы над очагом горения была 10 м, азимутальное смещение трассы относительно очага не превышало 10–15 м.

Во время экспериментов аэрозоль (дым) сносило ветром в направлении зондирования, т.е. дальше от лидара. Из рис. 1, а следует, что после второго эксперимента за 10 мин шлейф сместился на расстояние примерно 300 м, радиальная скорость ветра составила 0,5 м/с. В третьем эксперименте в течение 20 мин дым переместился на расстояние 600 м.

Черно-белая шкала на рис. 1, а справа показывает величину эхосигнала в относительных единицах. Эхосигнал P_a скорректирован на квадрат расстояния и фактически качественно и количественно

отражает содержание аэрозоля в дымовом шлейфе. За единицу принят эхосигнал обратного рассеяния от молекул и частиц на расстоянии 1 км от лидара, на рис. 1, а ему соответствует светло-серый фон.

Заметим, что лидар располагался в кузове небольшого автомобильного фургона, поэтому в процессе измерений перемещение персонала внутри машины приводило к небольшому смещению лазерного луча в вертикальной плоскости. В результате форма дымового шлейфа на рис. 1, а имеет смещение по дальности, например в 21:35.

Рис. 1, а дает представление о распространении дыма во время проведения эксперимента, но не представляет никакой информации о турбулентном состоянии шлейфа. Обратимся к рис. 1, б, на котором показана разность эхосигналов лидара P_{a+t} и P_a , т.е. сигнал P_t . Здесь мы решили

показать именно разностный сигнал $P_{a+t} - P_a$, поскольку турбулентная добавка P_t на аэрозольном фоне довольно слабая, поэтому P_{a+t} почти не отличается от распределения P_a на рис. 1, а. Следует обратить внимание, что шкала на рис. 1, б отличается от таковой на рис. 1, а на порядок.

На рис. 1, б повышение сигнала P_t наблюдается вскоре после начала эксперимента (зажигания) непосредственно за дымовым шлейфом. Почему это происходит не внутри шлейфа, а снаружи? Дело в том, что в начале горения ширина шлейфа и, следовательно, ширина зоны с интенсивной турбулентностью составляют ≈ 10 м. Узкая турбулентная зона в данном случае служит фазовым экраном [18], который случайным образом вносит фазовый сдвиг в разные участки волнового фронта лазерного пучка. В результате пучок распадается на части и только на некотором удалении от экрана (шлейфа) возникают каустики и наблюдаются флуктуации интенсивности излучения. При обратном рассеянии волна второй раз пересекает турбулентную зону и лидар регистрирует эффект УОР [14], т.е. турбулентную добавку P_t . Но это происходит уже за дымовым шлейфом, т.е. за тонким фазовым экраном.

Заметим, что турбулентному лидару для регистрации эхосигналов требуется некоторое время для того, чтобы этот сигнал накопить. На это есть две причины. Во-первых, турбулентный лидар работает в режиме счета фотонов, когда для получения эхосигнала требуется отправить в атмосферу десятки тысяч лазерных импульсов с низкой энергией и для каждой дистанции просуммировать все пришедшие обратно фотоны. Во-вторых, турбулентный эффект УОР можно зарегистрировать только при усреднении на приемной апертуре флуктуаций приходящего из атмосферы излучения. В нашем эксперименте интервал усреднения составил 6,6 с, пространственное разрешение — 3 м. В лидаре УОР-5 частота следования лазерных импульсов 8 кГц.

Результат расчета параметра C_n^2 представлен на рис. 1, в. Повышение C_n^2 наблюдается в моменты зажигания на дистанции непосредственно за очагом горения. Наиболее отчетливо это проявилось в начале второго эксперимента. Заметим, что случайная погрешность определения параметра C_n^2 была $\approx 100\%$, поскольку пространственное и временное разрешение было предельным для лидара УОР-5.

На рис. 1, г показан временной график функции C_n^2 на дистанции 1660 м, где наблюдаются три пика C_n^2 : (1) $7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ в 21:02; (2) $25 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ в 21:13; (3) $72 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ в 21:27.

Проанализируем подробно данные, полученные во время второго эксперимента, когда лидар зарегистрировал максимальное значение параметра C_n^2 . На рис. 2 слева представлены эхосигналы P_{a+t} и P_a , справа — соответствующие им восстановленные профили C_n^2 . Первые эхосигналы (рис. 2, а) получены в 21:13:20 перед зажиганием. Параметр C_n^2

(рис. 2, б) можно принять за фоновое значение вдоль направления зондирования. Величина C_n^2 вдоль трассы в основном не превышала $4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, что отмечено пунктиром на рис. 1, г и графиках справа на рис. 2.

На рис. 2, в представлены эхосигналы, полученные вскоре после начала горения (21:13:40). Узкий пик шириной 30 м на обоих эхосигналах показывает повышение концентрации частиц над источником горения. Здесь важно отметить факт повышения сигнала P_{a+t} сразу за дымовым шлейфом, где наблюдается второй неострый пик шириной ≈ 300 м. Справа на графике C_n^2 (рис. 2, г) мы наблюдаем почти семикратное повышение интенсивности турбулентности. Реальное повышение интенсивности турбулентности и, следовательно, рост C_n^2 происходят внутри дымового шлейфа, но в силу специфики эффекта УОР лидар на это реагирует с некоторой задержкой.

На рис. 2, д показаны эхосигналы, полученные через 20 с по отношению к предыдущим на рис. 2, в. Первый пик стал шире, а его амплитуда больше (рис. 2, д), т.е. концентрация частиц в шлейфе выросла. Второй пик P_{a+t} тоже расширился, но его амплитуда при этом уменьшилась. Следовательно, параметр C_n^2 понизился до $20 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, а длина шлейфа составила ≈ 600 м.

Спустя еще 40 с (рис. 2, ж) величина первого пика почти не изменилась, но при этом амплитуда второго пика P_{a+t} фактически сравнялась с фоновым значением. Параметр C_n^2 (рис. 2, з) при этом приблизительно равен фоновому значению $4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$.

На рис. 2, и показан эхосигнал через 2 мин после начала эксперимента. Мы наблюдаем уширение дымового шлейфа до 80 м. Параметр C_n^2 теперь находится на уровне фонового значения (рис. 2, к). Резкое понижение интенсивности турбулентности свидетельствует об охлаждении дымовой струи в результате обмена теплом с окружающим воздухом. При этом понизился уровень температурных флуктуаций внутри шлейфа и, как следствие, уменьшились дисперсия флуктуаций коэффициента преломления и параметр C_n^2 . Из нашего эксперимента следует, что процесс выравнивания температуры продолжался в течение 2 мин.

На рис. 3 показано сравнение значений C_n^2 , полученных в непосредственной близости от очага горения на высоте 3 м (кривая 1) и с помощью лидара над очагом горения на высоте ~ 10 м (кривая 2). На рис. 4 представлено сравнение лидарных измерений C_n^2 с данными [19], полученными при моделировании низового природного пожара на высотах 3 и 10 м с помощью метеостанций АМК-03. Следует отметить, что на рис. 4 кривые, взятые из [19], искусственно наложены со смещением на временную шкалу рассматриваемых в настоящей статье экспериментов с целью сравнения амплитуды изменения C_n^2 .

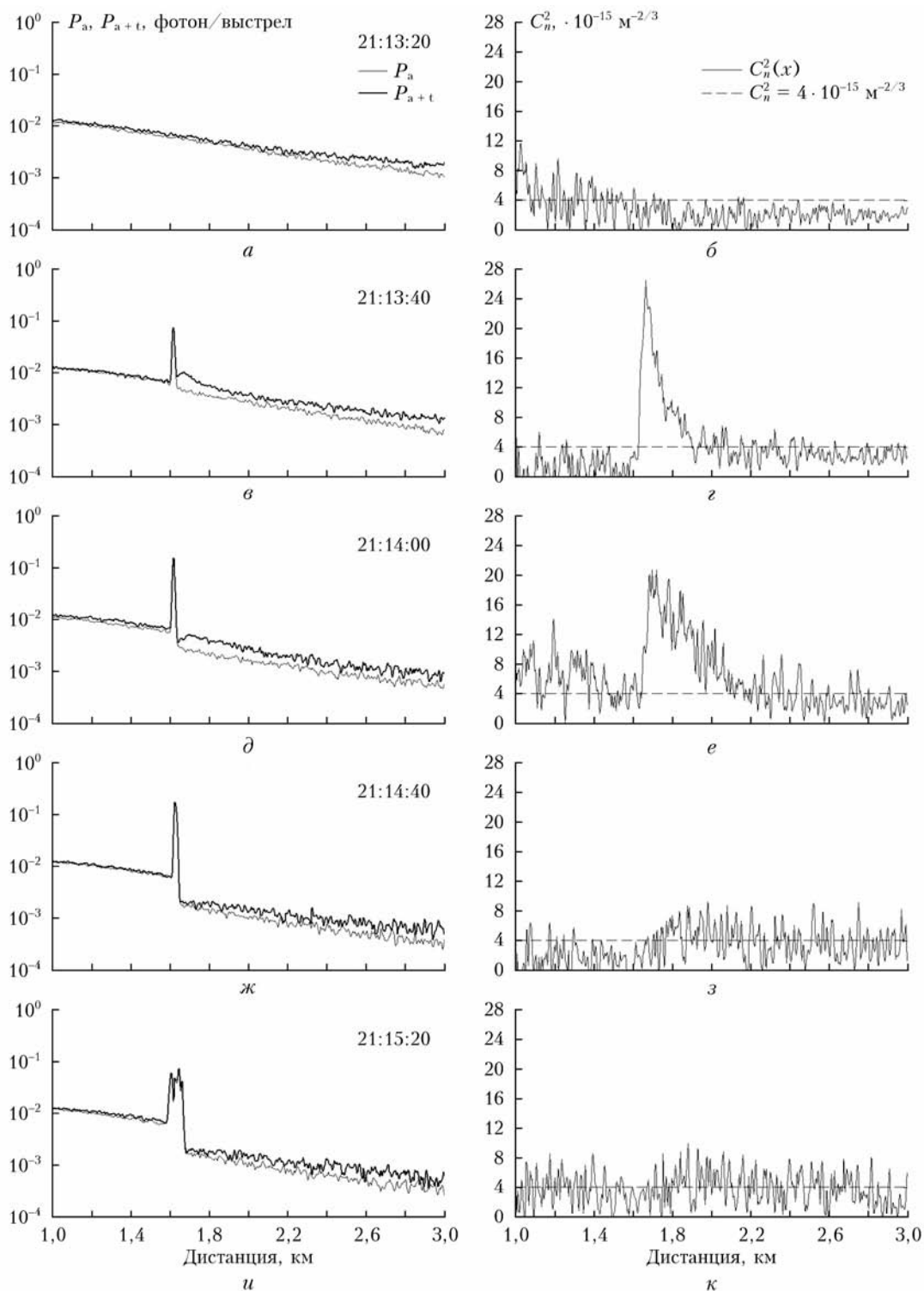


Рис. 2. Эхосигналы P_a и P_{a+t} (а, в, д, ж, и) и соответствующие им восстановленные профили параметра C_n^2 (б, г, е, з, к), полученные в разные моменты времени. Лидар УОР-5, 14.09.2023 г.

Из рис. 3 видно, что изменение C_n^2 , регистрируемое метеостанцией на высоте 3 м, происходит с некоторой задержкой по времени и на два порядка меньше значения C_n^2 , в то же время амплитуда изменения C_n^2 в [19] на порядок выше, чем в нашем

случае. Задержку по времени и заниженную амплитуду в нашем эксперименте можно объяснить тем фактом, что направление ветра не обеспечивало перенос конвективных потоков в сторону метеостанции, а в работе [19] метеостанция располагалась

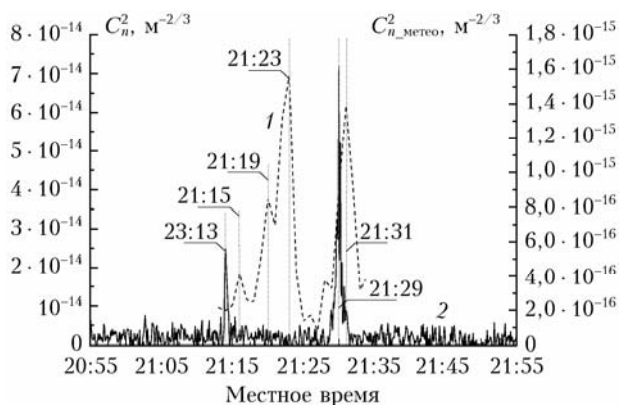


Рис. 3. Графики изменения значений C_n^2 , полученных на высоте 3 м в непосредственной близости от очага горения (кривая 1, правая шкала) и на высоте 10 м с помощью лидара (кривая 2, левая шкала)

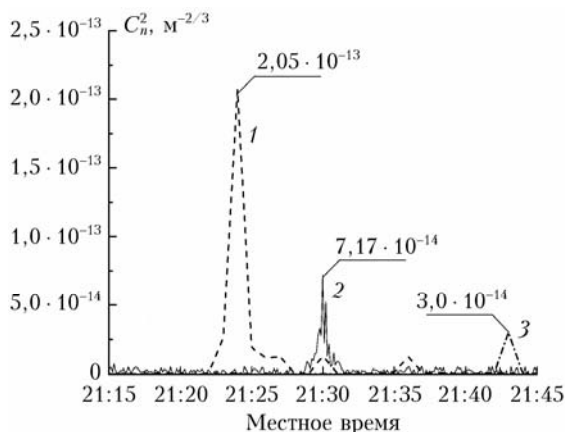


Рис. 4. Амплитуды изменения C_n^2 , полученные в [19] на высоте 3 м (кривая 1) и 10 м (кривая 3) и в нашей работе при помощи лидара на высоте 10 м (кривая 2)

по направлению ветра и распространения фронта модельного пожара. Кроме того, величина горизонтальной компоненты скорости ветра в [19] в несколько раз выше, что обеспечивало эффективный снос конвективных потоков в сторону метеостанции. В то же время амплитуда изменения C_n^2 на высоте 10 м (кривая 3) примерно в два раза ниже, чем регистрируется лидаром в нашей работе, что объективно обусловлено удаленностью мачты с метеостанцией в эксперименте [19] от очага горения, вызванной необходимыми мерами безопасности и сохранности оборудования.

Отдельно следует отметить, что на рис. 3 кривая 1 имеет локальные максимумы в 21:19 и 21:23, незарегистрированные лидаром и превышающие значения C_n^2 (кривая 2) во время проведения эксперимента. Эти максимумы обусловлены тем, что после окончания эксперимента остатки тлеющих РГМ были убраны с экспериментальной площадки и сожжены в стороне от нее, а изменившееся направление ветра обеспечило снос конвективных потоков в сторону метеостанции.

Заключение

В результате проведенных исследований с применением микроимпульсного турбулентного лидара УОР-5 подтверждено существенное отличие фоновых значений от величины C_n^2 в окрестности модельного пожара, которое оценивалось лидаром перед началом эксперимента и ранее также регистрировалось с помощью ультразвуковых метеостанций АМК-03. С помощью лидара получены значения C_n^2 непосредственно над очагом горения на высоте 10 м. Сделано предположение о том, что индуцированная атмосферная турбулентность и увеличение концентрации аэрозоля над очагом пожара может рассматриваться как характерный признак, пригодный для его дистанционного обнаружения.

В настоящей работе экспериментально показана практическая возможность зондирования интенсивности турбулентности в дымовом шлейфе лидаром, работа которого основана на эффекте увеличения обратного рассеяния. Лидар регистрировал относительную плотность аэрозольных частиц внутри дымового шлейфа и его ширину.

В течение первых двух минут после начала горения лидар позволял определить интенсивность турбулентности в виде структурной характеристики коэффициента преломления C_n^2 в дымовом шлейфе, который представлял собой тонкий фазовый экран. Размер зоны за шлейфом, в котором лидар регистрировал повышение эхосигнала в турбулентном приемном канале, составляла от 300 до 600 м. Ширина дымового шлейфа — от 20 до 40 м. При увеличении концентрации аэрозоля в шлейфе эхосигнал быстро затухал и регистрация параметра C_n^2 становилась невозможной. Турбулентный лидар способен регистрировать изменение уровня дисперсии флуктуаций температуры внутри дымового шлейфа, пока его температура больше температуры окружающего воздуха. Когда шлейф плотный и/или широкий, эхосигнал за ним становится слабым и регистрация изменения уровня флуктуаций температуры невозможна.

Применение турбулентного лидара является перспективным способом обнаружения малых очагов горения, в том числе бездымного или с низким выбросом конденсированных продуктов горения. Для дальнейшей проработки деталей и технологии применения турбулентного лидара для обнаружения очагов пожаров исследования необходимо продолжить.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К. Сравнение приборов для измерения характеристик атмосферной турбулентности // Метеорол. и гидрол. 2008. № 11. С. 90–96.
2. Торгаев А.В., Казаков Д.В., Лукин В.П. Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе.

1. Акустические измерения уровня турбулентности и средней скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 5. С. 371–376. DOI: 10.15372/АОО20230506.
3. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы и его влияние на внешний масштаб турбулентности // *Изв. вузов. Физика*. 2017. Т. 60, № 6. С. 128–134.
4. *Борзилов А.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Соин Е.Л.* Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 7. С. 557–562. DOI: 10.15372/АОО20230704.
5. *Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б.* Измерение оптических характеристик атмосферы лазерной гетеродинной системой // *Журн. прикл. спектроскоп*. 2008. Т. 75, № 6. С. 906–908.
6. *Лукин В.П., Лукин И.П.* Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // *Компьютерная оптика*. 2024. Т. 48, № 1. С. 68–80. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1355.
7. *Гурвич А.С.* Лидарное зондирование турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2012. Т. 48, № 6. С. 655.
8. *Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Чуркина Т.В., Иванов А.В., Иванов В.А.* Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах центральной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 461–465.
9. *Гришин А.М., Алексеев Н.А., Брандандер О.П., Зальмеж В.Ф.* Распространение в приземном слое атмосферы термиков, возникающих при лесных пожарах // *Теплофизика лесных пожаров*. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. С. 76–85.
10. *Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Алексеенко Е.М.* Исследование влияния окружающей среды и слоя инверсии на параметры движения односкоростного, одно-температурного и однофазного термика // *Сопряженные задачи механики и экологии: избранные докл. междунар. конф.* 2000. С. 174–190.
11. *Loboda E., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V., Lutsenko A., Staroseltseva A., Perminov V., Marty-nov P., Loboda Yu., Orlov K.* Crown fire modeling and its effect on atmospheric characteristics // *Atmosphere*. 2022. V. 13, N 12. P. 1982. DOI: 10.3390/atmos13121982.
12. *Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашикарров 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.
13. *Кравцов Ю.А., Саичев А.И.* Эффекты двукратного прохождения волн в случайно неоднородных средах // *Успехи физических наук*. 1982. Т. 137, вып. 3. С. 501–527.
14. *Гурвич А.С.* Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
15. *Устройство для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере*: Пат. на полезную модель № 153460. Россия. Разенков И.А., Банах В.А., Надеев А.И.; Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 24 июня 2015 г.
16. *Разенков И.А., Надеев А.И., Зайцев Н.Г., Гордеев Е.В.* Ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5 // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 4. С. 289–297. DOI: 10.15372/АОО20200407; *Razenkov I.A., Nadeev A.I., Zaitsev N.G., Gordeev E.V.* Turbulent UV Lidar BSE-5 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 4. P. 406–414.
17. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
18. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 318 с.
19. *Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Гордеев Е.В., Тарканова В.А., Мартынов П.С., Орлов К.Е., Савин К.В., Дутов А.И., Лобода Ю.А.* Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. DOI: 10.15372/АОО20201011.

E.L. Loboda, I.A. Razenkov, M.V. Agafontsev, V.V. Reyno. Study of the effect of a wildfire on the local characteristics of the atmosphere using remote sensing methods.

This paper presents the results of an experiment on remote sensing of a smoke plume over a model fire with the use of a specialized lidar based on the backscatter enhancement effect and detecting optical turbulence. Burning was 1.600 m away, and the area of the model fire varied from 1, 9 and 25 m². It was found that during combustion, the lidar recorded an increase in the echo signal in the main receiving channel, which registers aerosol scattering and the turbulent component, relative to an echo signal in the additional receiving channel, which registers only the aerosol. The width of the smoke plume did not exceed 20 m, an increase in the main echo signal was observed immediately after the plume in the distance range up to 300 m. In this experiment, a plume of warm smoke acted as a phase screen that changed the coherent structure of the laser beam. After the completion of intensive combustion, the temperature inside the plume rapidly decreased and the lidar recorded only the aerosol content. The appearance of two signs in the echo signal – an increase in the aerosol concentration and turbulence intensity – clearly indicates a source of burning. The lidar estimation of the values of the structural characteristic of the refractive index C_n^2 at an altitude of 10 m above the combustion focus was compared with the data of the ultrasonic meteorological station AMK-03 at an altitude of 3 m and results of simulation of a grass-roots fire published earlier.