

Пространственная самокоррекция пятнистой структуры излучения мощных импульсных лазеров при оптическом пробое на атмосферных трассах

Н.Н. Бочкарев, А.М. Кабанов, В.А. Погодаев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 14.04.2008 г.

Представлены результаты натурных исследований по распространению мощного лазерного излучения в туманной дымке. Показана возможность дистанционной акустической регистрации перестройки интенсивности излучения по сечению пучка и вдоль трассы распространения. Впервые зафиксировано отсутствие плазменных образований на трассе распространения при плотностях энергии лазерного излучения, заведомо обеспечивающих условия оптического пробоя на аэрозольных частицах.

Ключевые слова: атмосфера, лазерное излучение, распространение, метеоусловия, аэрозоль, оптический пробой, оптоакустика.

Введение

Создание и развитие лазеров, позволяющих получать мощное когерентное излучение, результаты исследований по взаимодействию такого излучения с различными средами стимулировали поиск новых решений ряда практических задач. Список разрабатываемых технологий, использующих мощные лазеры, постоянно расширяется. Выделим одно из направлений таких разработок — оперативный ввод энергии лазерного излучения в заданную область пространства, удаленную на значительное расстояние от источника излучения. К предполагаемым технологиям данного направления можно отнести идеи управляемой траектории распространения молнии, беспроводной транспортировки энергии, дистанционного разрезания загрязненных крупногабаритных объектов, определения элементного состава аэрозольных частиц, загрязняющих воздушный бассейн, и т.д.

В качестве примера коснемся интенсивно развиваемой технологии лазерной проводки молниевых разрядов по заданной траектории. К настоящему времени выделены четыре основные физические задачи (помимо, разумеется, массы чисто технических проблем), без решения которых трудно ожидать перехода прообраза имеющихся систем из разряда экспериментальных установок в ряды систем, функционирующих в рабочем («рутинном») режиме. Необходимо:

- 1) понимание процессов инициирования разрядов;
- 2) знание особенностей прохождения лазерного излучения через толщу атмосферы (эффективность транспортировки);

3) умение эффективно формировать высокоионизованный канал в атмосфере;

4) наличие методики задания времени включения лазера.

Из перечисленных задач, сформулированных в [1–3], вторая и третья являются «атмосферно-оптическими», более того относятся к разделу нелинейной оптики атмосферы, т.е. включают в себя задачу распространения мощного лазерного излучения (МЛИ) в атмосфере с учетом всего многообразия нелинейных эффектов, реализующихся при взаимодействии МЛИ с веществом атмосферы. В немалой степени это касается и четвертой задачи.

При решении проблемы влияния атмосферных факторов на ослабление лазерного излучения в большинстве случаев рассматриваются задачи прогноза влияния атмосферы на характеристики тех или иных лазерных систем. Для описания оптических характеристик атмосферы используются их статистические модели, представляющие собой средние распределения для различных регионов или сезонов [4].

Специфика задачи учета атмосферных факторов при натурных исследованиях и испытаниях мощных лазерных систем состоит в том, что аппаратура и методики, используемые для решения этой задачи, должны обеспечивать диагностику и учет влияния вполне конкретных метеорологических и оптических характеристик атмосферного канала, имевших место в момент проведения эксперимента, без нарушения целостности лазерного пучка [5, 6]. Такая постановка наталкивается на определенные трудности, связанные, в частности, с проблемами оперативной оценки оптических характеристик аэрозолей, не говоря уже о динамике этих характеристик в процессе взаимодействия мощного излучения с частицами аэрозолей [5].

* Николай Николаевич Бочкарев (bonic@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Виталий Алексеевич Погодаев.

В работе [7] впервые выполнены измерения коэффициента поглощения оптического излучения реальной атмосферой на основе явления генерации звука при нагреве атмосферы амплитудно-модулированным пучком излучения CO_2 -лазера. Зафиксирована существенная пространственно-временная изменчивость коэффициента поглощения. Полученные результаты дают основание полагать, что ответственность за сильные флуктуации коэффициента поглощения несет аэрозоль. Для атмосферной нелинейной оптики эти флуктуации являются одним из определяющих факторов ухудшения когерентности лазерных пучков.

Следует отметить, что в [7] зафиксировано влияние аэрозоля на коэффициент поглощения атмосферного канала распространения лазерного излучения при использовании низкоэнергетического излучения (непрерывное излучение мощностью 550 Вт модулировалось с частотой 4–16 кГц). При этом структура и целостность аэрозольных частиц не нарушались [5].

Экспериментальные исследования оптико-акустического эффекта при изменении фазового состояния вещества аэрозоля в контролируемых лабораторных и природных условиях [8–12] показали, что параметры генерируемых в канале мощного импульсного лазерного излучения акустических сигналов определяются как характеристиками поглощенного излучения, так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами поглощающей среды. В зависимости от степени энергетического воздействия лазерного излучения на вещество атмосферы и в соответствии с принятой в периодической печати терминологией можно выделить следующие наиболее значимые механизмы оптоакустической генерации звука: термооптический, регулярное испарение и взрывное вскипание жидких аэрозольных частиц, оптический пробой (так называемые режимы взаимодействия). Эти же механизмы определяют и уровень ослабления лазерного излучения, инициирующего их появление в атмосферном канале. Определение основных механизмов ослабления лазерного излучения атмосферой в различных погодных условиях является необходимым условием правильной интерпретации полученных результатов и правильного планирования работ по оптимизации транспортировки лазерного излучения через атмосферу.

Подчеркнем, что основное преимущество оптического способа генерации звука заключается в его дистанционности. Возможность принимать акустический отклик среды при любых азимутальных и зенитных углах направленности оптической оси лазерного пучка лимитируется по дальности в основном уровнем энергии МЛИ, перешедшей в энергию источника звука.

Акустическая энергия, излучаемая взрывом отдельной капли тумана, не превышает $\sim 10^{-10}$ Дж при плотности энергии лазерного излучения (длина волны $\lambda = 10,6$ мкм) в диапазоне 2–6 Дж/см² [13]. В то же время отдельный плазменный очаг, инициированный частицей аэрозоля примерно такого же размера, излучает $\sim 10^{-3}$ Дж, что значительно превышает

уровень, излучаемый взрывом водной капли. Количество возникающих в пучке мощного излучения плазменных очагов определяется энергией лазерного излучения, концентрацией и микроструктурой аэрозоля.

Именно акустический метод регистрации параметров процесса взаимодействия лазерного излучения с частицами аэрозоля при распространении на приземных атмосферных трассах в различных метеоусловиях позволил дистанционно установить их идентичность параметрам этих же процессов, реализуемым в контролируемых лабораторных условиях [13]. Данное обстоятельство позволило, с одной стороны, в полной мере использовать накопленную к настоящему времени лабораторную базу данных по взаимодействию мощного излучения с частицами аэрозоля для уверенной интерпретации степени его энергетического ослабления в реальной атмосфере. С другой стороны, метод, не нарушая целостности лазерного пучка, позволяет контролировать не только энергетические, но и пространственные его параметры (распределение энергии по поперечному сечению).

Поперечное сечение пучков лазерного излучения при распространении на атмосферных трассах может существенно меняться. При этом следует помнить, что изменениям подвержены как апертура пучка вследствие первоначальной расходимости (или вследствие фокусировки на заданную дальность), так и положение центра тяжести из-за регулярной рефракции и самонаведенных оптических неоднородностей в среде.

Таким образом, дистанционно установив режим взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом атмосферы, можно оценить плотность энергии излучения на конкретном участке трассы распространения.

В данной статье приводятся результаты экспериментального исследования впервые наблюдаемых эффектов «дыхания» лазерного пучка при распространении в реальной атмосфере и отсутствия плазменных очагов на трассе при плотностях энергии лазерного излучения, превышающих порог оптического пробоя атмосферы. Эффекты обнаружены по акустическому отклику атмосферного канала распространения лазерного излучения.

Аппаратура и процедура комплексных измерений

Состав экспериментального комплекса можно условно разделить на три группы.

– Источник лазерного излучения, юстировочные системы, аппаратура регистрации параметров излучения в начале трассы (энергии, длительности и формы импульса).

– Атмосферная трасса (орография, расположение по розе ветров), аппаратура регистрации стандартных метеопараметров: температуры, давления, влажности воздуха, направления и скорости ветра, а также аппаратура измерения концентрации

и распределения частиц аэрозоля по размерам, метеорологической дальности видимости, структурной постоянной флуктуаций показателя преломления C_n^2 .

– Регистраторы атмосферного отклика на воздействие мощного лазерного излучения (акустический и оптический отклики), энергии излучения, временной формы импульса излучения.

Сохранялась неизменной геометрия лазерного пучка $F/a_0 = 900$ (F – фокусное расстояние передающего зеркального телескопа, формирующего пучок излучения с начальным радиусом a_0). В экспериментах использовалось близкое к аксиальносимметричному излучение импульсного CO_2 -лазера микросекундной длительности.

Не вдаваясь в детали состава всего комплекса, более подробно охарактеризуем трассу распространения и регистраторы акустического и оптического откликов. Ориентация трассы по розе ветров была выбрана вдоль преимущественного направления распространения воздушных масс. Таким образом, сводилось к минимуму влияние перемещения воздушных масс поперек пучка на оптические характеристики канала распространения лазерного излучения. Длина трассы для рассматриваемых экспериментальных данных составляла $\sim 0,5$ км.

Дисперсный состав аэрозоля определялся счетчиком частиц типа АЗ-5. Работы проводились при наличии на трассе распространения туманной дымки. Зафиксированные функции распределения частиц аэрозоля по размерам показаны на рис. 1.

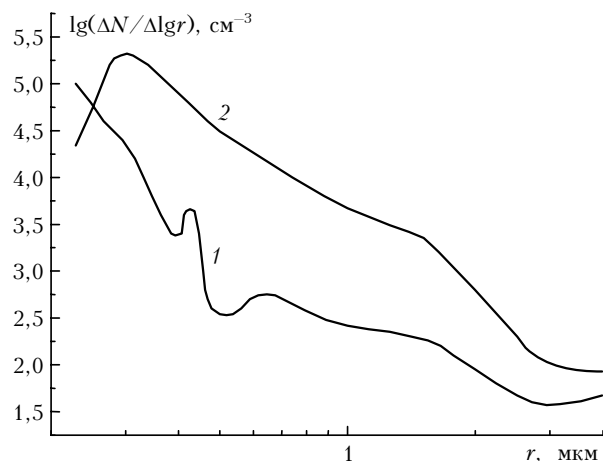


Рис. 1. Влияние влажности на функцию распределения частиц туманной дымки по размерам

Прослеживается эволюция дисперсного состава туманной дымки (кривые 1, 2) с ростом влажности (таблица). Необходимо отметить, что формирование туманной дымки происходило на основе летней дымки. Относительная влажность воздуха, характеризующая первый пуск лазерного излучения, достигла 93% за 1 ч (с 23:23 – кривая 1 до 00:28 – кривая 2).

Аэрозольная составляющая невозмущенного мощным лазерным излучением коэффициента ослабления атмосферы определялась в соответствии с [14].

Метеорологические и оптические условия, характеризующие оптические свойства атмосферно-оптического канала на момент пуска импульса лазерного излучения

№ пуска	Время пуска	RH, %	t, °C	S_m , км	V, м/с	$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$, км ⁻¹	α_{CO_2} , км ⁻¹	α_a , км ⁻¹	E_ϕ , Дж/см ²	T
1	23:23	91	12,7	8,5	3/6	0,172	0,066	0,185		
2	23:30	92	12,6	8,0	»	0,174	»	0,196		
3	23:34	»	12,5	»	»	0,181	»	»		
4	00:18	93	11,9	6,7	2/5	0,169	0,065	0,235		
5	00:28	»	11,8	6,1	2	0,165	»	0,258	13	0,92
6	00:32	»	»	5,8	»	»	»	0,271	17,5	0,56
7	00:37	»	11,7	5,4	»	0,164	»	0,291	16	0,59
8	00:41	»	»	5,1	»	»	»	0,308	12	0,75
9	00:44	»	11,6	5,0	»	0,163	0,064	0,314	14	0,5
10	00:48	»	»	4,7	»	»	»	0,334	11,5	0,52
11	00:52	»	11,5	4,4	1	0,164	»	0,357	9	0,67
12	00:57	»	11,4	4,1	»	0,160	»	0,383	10,5	0,48
13	01:03	»	11,3	»	»	0,112	»	»	9	0,89
14	01:38	95	10,5	5,0	2	0,153	0,063	0,314	16	0,47
15	01:44	»	»	»	»	»	»	»	14	0,29
16	02:21	96	10,3	4,3	»	»	»	0,365	8,5	0,47
17	02:28	»	10,2	4,1	»	0,152	»	0,383	7	0,43
18	02:33	»	»	3,9	»	»	»	0,403	6	0,42
19	02:37	»	10,1	3,7	»	0,150	»	0,425	7	0,29
20	02:41	»	10,0	3,5	»	0,149	0,062	0,449	5,5	0,55

Примечание. Давление $P = 740$ мм рт. ст.; $C_n^2 \sim 10^{-16}$ см^{-2/3} не изменялись во время измерений; RH, t – относительная влажность и температура воздуха; S_m , V – метеорологическая дальность видимости и скорость ветра; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ – коэффициент континуального поглощения излучения с $\lambda = 10,6$ мкм парамаи воды; α_{CO_2} – коэффициент резонансного поглощения излучения углекислым газом; α_a – коэффициент аэрозольного ослабления излучения; E_ϕ – усредненная по сечению пучка плотность энергии лазерного излучения в фокальной области без учета ослабления по трассе; T – пропускание лазерного излучения трассой.

Пространственная самокоррекция пятнистой структуры излучения мощных импульсных лазеров...

Компоненты газовой составляющей рассчитывались по метеоданным согласно [15].

Регистратор акустического отклика атмосферы на воздействие МЛИ работал по следующей схеме. Микрофон с частотной полосой пропускания 20 кГц и динамическим диапазоном ~54 дБ размещался на расстоянии ~1 м от оси пучка излучения в перпендикулярном к ней направлении. При оформлении архива «звуковых дорожек» использовалось двенадцатиразрядное АЦП с частотой дискретизации 36 кГц. Длительность импульса лазерного излучения была много меньше времени пробега звука поперек пучка.

Физические основы акустического метода как индикатора процесса взаимодействия МЛИ с частицами аэрозоля изложены в [5]. С методикой приема, записи и расшифровки «звуковых дорожек», формируемых плазменными очагами (ПО), инициированными воздействием МЛИ на отдельные частицы аэрозоля, можно подробно ознакомиться в [16]. Вопросы обработки регистрируемых акустических сигналов и их возможные искажения влиянием атмосферы и подстилающей поверхности обсуждены в [17]. Диссипативные, дифракционные и нелинейные искажения формы генерируемых в канале МЛИ акустических сигналов прогнозируются и учитываются в алгоритме разработанного программного обеспечения «Атмосферная оптоакустика». Алгоритм программы восстанавливает исходные характеристики акустических сигналов на основе имеющихся метеорологических данных и геометрии эксперимента, а также спектральных многоканальных преобразований.

Под оптическим откликом атмосферного канала понимается визуализация новых свойств канала распространения МЛИ, например длинной лазерной искры (ДЛИ), или перераспределение интенсивности излучения по сечению канала за счет возникновения рефракционных отклонений. При этом отклик должен быть зафиксирован либо фотографически (ДЛИ), либо в виде соответствующей реплики (изменение рельефа экрана). В качестве материала для реплик (экрана) применялись листы плотного картона. Соответствующие экраны устанавливались в пучок излучения позади болометрического измерителя энергии проходного типа в конце трассы. Подобная процедура применялась при проведении очередной серии экспериментов и в начале трассы (до входа в телескоп) с целью качественного контроля первоначального распределения интенсивности излучения по сечению пучка. При необходимости использовались лавсановые ослабители. Характер повреждения поверхностных слоев реплик, полученных в полевых условиях, воспроизводился в лабораторных измерениях при соответствующем контроле уровня энергии воздействующего излучения.

Согласно [18] излучение CO₂-лазеров оставляет заметные отпечатки на картоне при ~2 Дж/см². Анализ изображений пучка, зарегистрированных в начале трассы, показал, что при сохранении условий формирования излучения и рабочей смеси лазера воспроизводимость структуры и формы пучка удов-

летворительна. Это обстоятельство позволяет быть уверенным в том, что, несмотря на отсутствие возможности одновременной регистрации структуры пучка в различных участках трассы, сравнение и анализ изображений пучка, полученных в различных точках трассы для различных пусков излучения, правомерны при условии несущественного изменения метеопараметров за время измерений.

Обеспечение аппаратурной обработки изображений пучка, зафиксированных на картоне, осуществлялось перефотографированием цифровой камерой и вводом в компьютер. Для устранения влияния на результаты обработки пространственных неоднородностей, вызванных флуктуациями интенсивности лазерного излучения [19], корреляционный анализ изображения выполнялся по контуру, симметричному относительно центра пучка. Наличие неоднородного распределения энергии по сечению пучка определяет поведение корреляционной функции, обуславливая появление характерных пространственных масштабов ее изменения.

В изображении пучка, зафиксированного в начале трассы, в области положительной корреляции имеются три масштаба. Первый масштаб с радиусом 1,5 мм, второй – 1,2 см. Третий масштаб положительной корреляции (радиус корреляции) определяется размерами и качеством пучка как целого. Первые два масштаба корреляции отчетливо прослеживаются на изображении пучка, снятом на фотопленку с реплики в начале трассы, и денситограмме, полученной для этого случая с помощью микроденситометра (рис. 2, кривая 5).

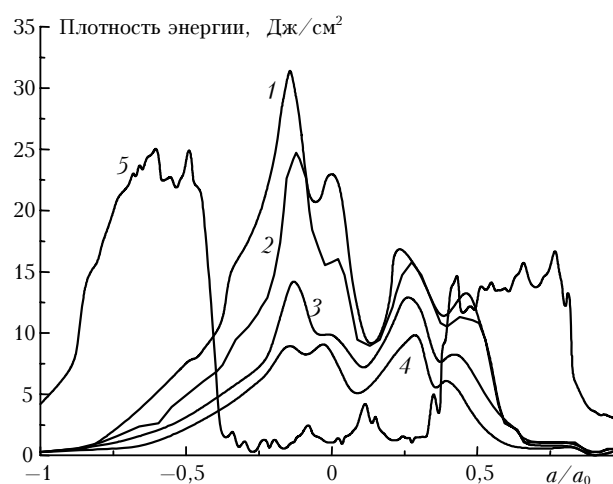


Рис. 2. Распределение энергии по сечению лазерного пучка

В данном случае микроденситограмма являлась качественным репером вычислений.

Результаты измерений и обсуждение

Авторами в [17] отмечалось, что помимо импульсов от отдельных ПО в акустическом отклике канала распространения МЛИ содержится термоакустический сигнал, который несет в себе отпечаток

распределения энергии излучения по сечению лазерного пучка, т.е. может служить индикатором энергетической неоднородности пучка. Физическая картина процесса поглощения излучения (резонансное поглощение на переходе $10^0\text{--}00^01$ молекул углекислого газа и одновременная термализация лазерной энергии, поглощаемой парами воды) и вызываемых им изменений термодинамических характеристик воздуха описана в [20]. Экспериментальная часть [20] выполнена в широком интервале изменения метеословий. Температура воздуха в ходе экспериментов менялась от -7 до 25 °С, влажность от 2 до 15 г/м³. Одновременно с акустической регистрацией неоднородности распределения энергии по сечению лазерного пучка проводились прямые болометрические измерения. Показано, что интенсивные и крупные детали распределения, их относительные размеры, расстояния между ними, ориентация друг относительно друга достаточно хорошо восстанавливаются акустическим методом.

Необходимо отметить, что в [20] акустическую регистрацию проводили в конкретном сечении пучка. Требуется несколько акустических приемников, расположенных в плоскости этого сечения, что возможно лишь на горизонтальных приземных трассах. При этом уже невозможно говорить о дистанционности подобных измерений.

На рис. 2 показан пример восстановления с помощью программного обеспечения «Атмосферная оптоакустика» распределения энергии по сечению пучка МЛИ (кривые 1–4). Расстояние d по трассе от фокусирующей системы равно 400 м.

В данном случае регистрация термоакустического сигнала, генерируемого каналом МЛИ, проводилась одним приемником, удаленным на расстоянии 30 м от оси пучка излучения. Учитывались цилиндрическая расходимость акустической волны и поглощение звука. Видно, что для целей оценки однородности энергетической наполненности по сечению лазерного пучка однопозиционный прием вполне достаточен. При уменьшении энергии излучения диаметр пучка не изменяется, а неоднородность распределения энергии по сечению уменьшается. Следует отметить значительную трансформацию поперечной структуры лазерного пучка при прохождении участка трассы распространения. Уровень энергетической наполненности области приосевого провала, наблюдающегося в лазерном пучке перед системой фокусировки (кривая 5), значительно повышается при прохождении участка трассы (кривые 1–4).

Пример оптико-акустического исследования процесса формирования ДЛИ при распространении МЛИ в условиях наличия в атмосфере туманной дымки представлен на рис. 3.

Значения акустических давлений получены усреднением по акустике № 5–13 (см. таблицу): $P_{\text{по,max}}$, $P_{\text{по,min}}$ – амплитуды звуковых давлений, генерируемых наиболее крупными и наиболее мелкими ПО соответственно.

Усреднение проводилось по всем плазменным очагам, начиная с $d = 440$ м, содержащимся на после-

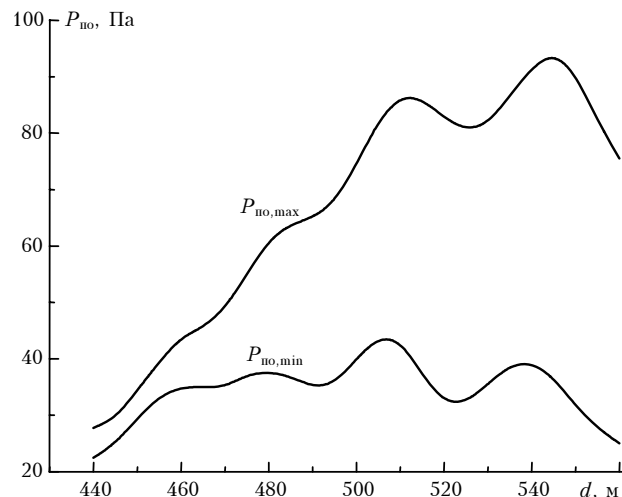


Рис. 3. Амплитудно-пространственное распределение полей акустических давлений, формирующихся вдоль трассы распространения лазерного пучка

дующих участках трассы длиной 5 м. Область возможных звуковых давлений, генерируемых отдельными ПО, находится между кривыми, соответствующими $P_{\text{по,max}}$ и $P_{\text{по,min}}$. Лазерное излучение фокусировалось на расстоянии 530–540 м. Порог оптического пробоя на расстоянии от фокусирующей системы 440 м составил $20\text{--}25$ Дж/см². Устойчивые продольные флуктуации величин $P_{\text{по,max}}$ и $P_{\text{по,min}}$ с пространственным масштабом ~ 30 м свидетельствуют о продольных флуктуациях плотности энергии лазерного излучения в пучке и характеризуют продольную изменчивость распределения плотности энергии по сечению пучка. Волны плотности, образовавшиеся в процессе взаимодействия аэрозоля и излучения, сосредоточенного в тонкой структуре лазерного пучка, являются оптическими неоднородностями, способными изменять во времени фазовые соотношения между сходящимися нитями пучка. Данное обстоятельство может вызвать перестройку пространственной структуры пучка излучения.

Изменения плотности среды в результате высокоэнергетического режима взаимодействия излучения с частицами аэрозоля носят характер распространяющихся по сечению пучка волн сжатия и разрежения, образующихся в области перепада интенсивности излучения. При длительностях импульса излучения $\tau_{\text{и}} \geq \tau = R/C_{\text{зв}}$ (R – размер нити пучка, $C_{\text{зв}}$ – скорость звука) отклик среды будет существенно нелокальным, зависящим от распределения поля в предыдущие моменты времени. В соответствии с вышесказанным при существующих в пучке излучения в начале трассы размерах высокоэнергетических нитей величина $\tau \sim 10^{-6}$ с. Следствием этого может являться изменение структуры сходящихся волн, а следовательно, структуры поля в пучке. Происходит стягивание поля в приосевую зону (усреднение по сечению пучка) с одновременным возрастанием пространственной модуляции интенсивности излучения. Обработка реплик, полученных в фокальной области пучка, показывает наличие выбросов интенсивности размером $\sim 1\text{--}3$ мм. Расстояние между

Заключение

такими выбросами ~5–7 мм. Количество мелкомасштабных выбросов интенсивности в фокальной области значительно больше таковых в начале трассы. Провести достоверную оценку плотности энергии излучения в мелкомасштабных выбросах не удалось из-за сильного и разнообразного повреждения ими реплики. Такие повреждения начинались с плотности энергии лазерного излучения ≥ 80 Дж/см². При этом совершенно исчезают контрастные границы крупномасштабных областей энергетической неоднородности. Распределение энергии излучения по сечению лазерного пучка (без учета мелкомасштабных выбросов) приобретает супергауссову форму.

Анализ полученных данных с точки зрения зависимости пропускания излучения T по трассе от плотности энергии лазерного излучения и метеорологических выявил интересную особенность. Значения T для пусков № 5–13 заметно отличаются от значений T для пусков № 14–20. Скорость падения зависимости $T(E_{\text{ф}})$ для первой группы составляет 0,018 при увеличении энерговыклада в среду на 1 Дж/см², а для второй группы – 0,006. Из таблицы видно, что начальные плотности энергии лазерного излучения при входе на трассу распространения разнятся незначительно, а чувствительность пропускания к условиям распространения, возникающим в процессе взаимодействия МЛИ и атмосферы, для одинаковых значений $E_{\text{ф}}$ в обеих группах в три раза выше для первой группы.

Согласно таблице между пусками лазерного излучения первой и второй групп был получасовой перерыв в связи с техническим обслуживанием экспериментального стенда. Данные принципиально отличаются друг от друга наличием ПО на трассе для первой группы и полным отсутствием для второй. Необходимо подчеркнуть, что аппаратура акустической регистрации и измерители энергии лазерного излучения работали в штатном режиме. Измерители энергии лазерного излучения после окончания серии пусков проверялись на разброс их параметров относительно начала работ. Отклонений не обнаружено.

Основными процессами взаимодействия МЛИ с частицами аэрозоля при распространении в условиях присутствия на трассе туманной дымки являются испарение жидкой фазы аэрозолей, приводящее к просветлению канала взаимодействия, и пороговое возникновение на твердых частицах ПО [21]. Эти два процесса в зависимости от энергии импульса лазерного излучения, концентрации и микроструктуры аэрозоля, существенно зависящих от влажности воздуха, определяют передаточные свойства атмосферного канала.

В рассматриваемой ситуации отношение $\tau_{\text{к}}/\tau_0$ менялось от 0,3 до 2,28 для первой группы данных и от 1,62 до 3,47 для второй. Здесь τ_0 – начальная оптическая толщина трассы, рассчитанная по метеоданным; $\tau_{\text{к}}$ – оптическая толщина трассы к моменту окончания импульса лазерного излучения. Видно, что при наличии на трассе ПО возможно как просветление атмосферного канала, так и его замутнение. Для второй группы данных наблюдается устойчивое замутнение.

Таким образом, привлечение методики качественного исследования распределения интенсивности по сечению пучка МЛИ с помощью реплик в полевых условиях показало наличие ее существенной перестройки в течение импульса излучения. В отдельных точках сечения происходит кратное локальное возрастание интенсивности излучения.

Акустическое сопровождение натуральных исследований в произвольной (либо труднодоступной) точке трассы позволяет дистанционно без применения акустической томографии оценить процесс такой перестройки при различных оптико-метеорологических ситуациях в атмосфере и достижении критических значений интенсивности МЛИ для возникновения нелинейных оптических эффектов на трассе при взаимодействии его с аэрозолем.

Акустическое сопровождение исследований позволило впервые достоверно зафиксировать на приземной трассе отсутствие ПО при плотностях энергии МЛИ, обеспечивающих условия оптического пробоя на аэрозольных частицах. Данное обстоятельство подчеркивает актуальность продолжения предложенного в [22] анализа возможности повышения условий стабильности пропускания атмосферы для МЛИ.

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // *Успехи физ. наук.* 2000. Т. 170. № 7. С. 753–769.
2. *Стариков А.А., Резунков Ю.А.* Управление разрядом молний с помощью лазерного излучения // *Оптич. ж.* 1999. Т. 66. № 3. С. 15–16.
3. *Шигиакчи Учиды, Эшинори Шимада, Хирохико Ясудо, Шинжи Мотокоши, Чийоэ Ямонако, Дзен-ичиро Кавасаки, Коджи Цубакимото.* Молния, инициированная лазером в полевых экспериментах // *Оптич. ж.* 1999. Т. 66. № 3. С. 36–39.
4. *Осипов В.М., Борисова Н.Ф., Галанцева О.М., Цуканов В.В.* Оценки аэрозольного ослабления в экспериментах по транспортировке лазерного излучения // *Оптич. ж.* 1999. Т. 66. № 11. С. 39–46.
5. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А.* Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
6. *Аксенов В.П., Банах В.А., Валуев В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смелихо И.Н., Цвык Р.Ш.* Мощные лазерные пучки в случайно-неоднородной атмосфере / Под ред. В.А. Банаха. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 341 с.
7. *Колосов В.В., Кузиковский А.В.* Исследование термооптической генерации звука в атмосфере // *Оптика атмосф.* 1988. Т. 1. № 3. С. 57–60.
8. *Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Погодаев В.А., Рождественский А.Е.* Оптико-акустические эффекты в жидкокапельном аэрозоле при импульсном оптическом воздействии // III Всесоюз. совещ. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде: Тезисы докл. Обнинск, 1985. Ч. 111. С. 42–45.
9. *Бочкарев Н.Н., Землянов А.А., Красненко Н.П., Погодаев В.А., Рождественский А.Е.* Акустический отклик аэрозольной среды при импульсном оптическом воздействии // *Письма в ЖТФ.* 1988. Т. 14. Вып. 1. С. 25–29.

10. Бочкарев Н.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Красненко Н.П. Режимы генерации звука жидкокапельным аэрозолем различного типа под действием лазерного излучения // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 10. С. 111–112.
11. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Сорокин Ю.М. Оптоакустические эффекты в аэрозолях // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 6. С. 563–578.
12. Ахтырченко Ю.В., Бочкарев Н.Н., Высоцкий Ю.П., Гарин О.В., Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Курашин А.И., Миронов В.Л., Погодаев В.А., Покасов В.В., Сидоров Б.Г. Диагностика параметров плазмы оптического пробоя атмосферы по акустическим измерениям // VIII Всесоюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докл. Томск, 1984. Ч. 2. С. 114–118.
13. Бочкарев Н.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Оперативная оценка ослабления мощного излучения импульсного СО₂-лазера на приземных атмосферных трассах // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 700–707.
14. Филитов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. Казань: КГУ, 1986. 157 с.
15. Блаховская Т.В., Мицель А.А. Инженерная методика оценки характеристик молекулярного поглощения в области 10,6 мкм // Распространение лазерного излучения в поглощающей среде. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. С. 67–80.
16. Бочкарев Н.Н., Землянов А.А., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Акустическая диагностика очагов пробоя в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1141–1144.
17. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Оптоакустика канала распространения мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 816–821.
18. Хирд Г. Измерение лазерных параметров (Экспериментальные методы оптической квантовой электроники): Пер. с англ. / Под ред. Ф.С. Файзулова. М.: Мир, 1970. 540 с.
19. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.
20. Покасов В.В., Воробьев В.В., Гурвич А.С., Дьяков А.С., Пряничников В.С. Определение структуры лазерного пучка акустическим методом в условиях кинетического охлаждения воздуха // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 8. С. 864–870.
21. Землянов А.А., Мальцева Г.А., Погодаев В.А. Прозрачность оптического канала во влажных дымках в условиях оптического пробоя // Оптика атмосф. 1989. Т. 2. № 6. С. 609–614.
22. Погодаев В.А. Прозрачность приземной атмосферы для излучения импульсного СО₂-лазера: условия стабильности коэффициента пропускания // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1133–1138.

N.N. Bochkarev, A.M. Kabanov, V.A. Pogodaev. Spatial self-correction of spotted radiation structure of high-power pulsed lasers at optical breakdown on atmospheric paths.

The results of *in-situ* investigations on high-power laser radiation propagation in a haze have been presented. The possibility of remote acoustic recording of radiation intensity tuning upon beam cross section and along propagation path was shown. The absence of plasma formations on the propagation path at laser radiation energy density providing for optical breakdown conditions on aerosol particles was observed for the first time.