

Влияние фронтальной зоны на прозрачность атмосферы для высокоэнергетических лазерных пучков

В.А. Погодаев*

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

Поступила в редакцию 21.01.2013 г.

Анализируются условия пропускания атмосферы для импульсного мощного лазерного излучения в условиях прохождения через район измерений атмосферного холодного фронта. Отмечается, что для выполнения прогностических оценок пропускания такого излучения необходима непосредственно перед пуском регистрация аэрозольной компоненты, включая субмикронную фракцию.

Ключевые слова: лазерное излучение, распространение, атмосферный холодный фронт; laser radiation, propagation, atmospheric cold front.

Прогресс в развитии лазеров и увеличении их мощности привел к значительному росту исследований, связанных с доставкой лазерного излучения нужного качества (размер пучка, равномерность облучения, форма и длительность импульса и др.) в заданную область пространства, удаленную на значительное расстояние от источника излучения. Поскольку доставка, как правило, осуществляется через атмосферу, необходимы количественные данные о ее влиянии на параметры пучка излучения.

Распространение мощного лазерного излучения в атмосфере сопровождается большим набором явлений линейного и нелинейного характера [1]. Необходимо отметить, что ни одно из них не проявляется в отдельности, хотя в большинстве случаев доминирующим и наиболее разнообразным взаимодействием мощного лазерного излучения с веществом атмосферы является его взаимодействие с частицами аэрозоля. Характер этого взаимодействия весьма изменчив в зависимости от спектральных, энергетических и временных характеристик лазерного излучения.

Проблема повышения энергетической наполненности излучения в заданном объеме среды традиционно решается фокусировкой пучка излучения соответствующими оптическими системами. В результате в пределах пучка возникают различные режимы воздействия лазерного излучения на отдельные частицы аэрозоля: от испарения водных оболочек (или водных капель) до их взрыва и оптического пробоя. В условиях низкой влажности преобладают горение углеродсодержащего аэрозоля и плавление (также с возможностью взрыва и пробоя) твердых частиц почвы или антропогенного аэрозоля.

Чтобы оценить, как атмосферные факторы влияют на ослабление лазерного излучения, решаются

задачи прогноза воздействия атмосферы на характеристики тех или иных лазерных систем. Для описания исходных оптических характеристик атмосферы используются их статистические модели, представляющие собой средние распределения для различных регионов или сезонов.

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, имевшего место в момент проведения пуска лазерного излучения, без нарушения целостности пучка излучения [1, 2]. Такая постановка наталкивается на определенные трудности, связанные, в частности, с проблемами оперативной оценки оптических и микрофизических характеристик аэрозолей, не говоря уже о динамике этих характеристик в процессе взаимодействия мощного излучения с частицами аэрозоля [1].

Знание основных механизмов ослабления лазерного излучения атмосферой в различных погодных ситуациях является необходимым условием правильной интерпретации полученных результатов и правильного планирования работ по оптимизации транспортировки лазерного излучения через атмосферу. В [3] дан предварительный анализ результатов натурных экспериментов по устойчивости коэффициента пропускания атмосферой импульсного мощного лазерного излучения для различных типов оптической погоды при сохранении исходных параметров излучения. Влияние на коэффициент пропускания режима работы мощных CO₂-лазеров (непрерывный, импульсно-периодический, импульсный) типа оптической погоды наиболее непредсказуемо для импульсного режима [4].

* Виталий Алексеевич Погодаев (kam@iao.ru).

Из полученных результатов [3, 4] следует, что необходимо решать проблему оперативного определения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в конкретный момент времени, что не решено в плане технологической проработки соответствующих средств. Следует подчеркнуть, что экспериментальные исследования распространения мощного лазерного излучения при любом режиме работы источника в атмосфере довольно трудоемки, затратны и, как правило, имеют в настоящее время уникальный характер.

Продолжаются поиск новых бесконтактных методик оценки динамики энергетических и точностных характеристик пучка мощного лазерного излучения на атмосферных трассах, выявление ранее не предполагаемых явлений. Так, акустическое сопровождение исследований распространения импульсного мощного лазерного излучения на приземной трассе позволило впервые достоверно зафиксировать отсутствие в пучке излучения плазменных образований при плотностях энергии излучения, обеспечивающих условия оптического пробоя на аэрозольных частицах [5]. Данное обстоятельство подчеркивает актуальность продолжения начатого [3] анализа стабильности пропускания атмосферой мощного лазерного излучения.

Большое влияние на вероятность возникновения плазменных образований оказывает несовершенство пространственно-временной структуры самого пучка мощного излучения. Пучки, как правило, имеют в своем поперечном сечении значительные энергетические неоднородности, отличающиеся от среднего уровня до 2 порядков и изменяющиеся в течение импульса излучения [5, 6]. Согласно экспериментальной информации [5] усредненная по сечению пучка плотность энергии лазерного излучения в фокальной области превышала пороговую, при которой возникают пробойные явления на приземных трассах [7], до 2–3 раз. Тем не менее пропускание излучения атмосферой в период проведения измерений имеет интересную особенность. Значения пропускания в периоды 00:28–01:03 и 01:38–02:41 местного времени заметно отличаются. В промежутке времени 01:03–01:38 пусков излучения не проводилось. Сохранялась неизменной геометрия лазерного пучка $F/a = 900$ (F – фокусное расстояние передающего телескопа, формирующего пучок излучения с начальным радиусом a). В экспериментах использовалось излучение импульсного CO_2 -лазера микросекундной длительности. Для первого периода плазменные образования на трассе регистрировались в каждом пуске излучения. Во втором периоде отсутствовали полностью.

Скорость падения зависимости пропускания атмосферы от плотности энергии излучения в фокальной области при увеличении энерговыклада в среду на 1 Дж/см^2 для первого составляла 0,018, а для второго – 0,006. Следует подчеркнуть, что плотности энергии лазерного излучения вначале трассы распространения мало отличаются, а чувствительность пропускания к условиям распространения, возни-

кающим в процессе взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, для первого периода в 3 раза выше, чем для второго. Другими словами, в промежуток времени 01:03–01:38 значительно изменилась среда распространения мощного лазерного излучения. Однако модели расчета коэффициентов молекулярного поглощения [8] и аэрозольного ослабления [9] по измеренным метеопараметрам атмосферы дают для первого и второго периодов измерений усредненные величины ослабления 0,72 и 0,71. А экспериментально зафиксированные усредненные коэффициенты пропускания для тех же периодов – 0,65 и 0,42 соответственно. Разница очень существенна. Измерители энергии лазерного излучения до начала и после окончания пусков проверялись на разброс их параметров. Отклонений не обнаружено. Возникает естественный вопрос – в чем причина такого положения дел?

Молекулярное ослабление, рассчитываемое по моделям линейного (низкоэнергетического) взаимодействия излучения CO_2 -лазера, хорошо коррелирует с результатами натуральных исследований чистой (безаэрозольной) атмосферы [1]. Особенно следует выделить периоды затяжных дождей (1–2 сут) [3]. Имеющиеся модели для нелинейно поглощающей мощное лазерное излучение газовой атмосферы лишь предупреждают о возможности возникновения спектроскопического эффекта насыщения на переходах P -ветви полосы $10^0\text{--}00^01$ атмосферного CO_2 , характеризующегося пороговой интенсивностью $I_c \approx (0,2\text{--}0,5) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$, а также эффекта просветления далекого крыла полосы $0\ 1\ 0$ H_2O с пороговой интенсивностью $I_k \approx (2\text{--}3) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$. Приводимые в [10, 11] расчетные и экспериментальные (лабораторные) данные не охватывают параметры используемых для натуральных исследований CO_2 -лазеров по энергии импульсов, их длительности и размерам пучков.

Из полученных данных трехдневных натуральных измерений, частично изложенных в [5] и анализируемых в настоящей статье, можно заключить, что для достаточно чистой (безаэрозольной) атмосферы, когда отношение коэффициента молекулярного поглощения α_n ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) к коэффициенту аэрозольного ослабления α_a достаточно весомо (~ 3) и интенсивность лазерного излучения не превышает указанных выше порогов, отношение измеренных коэффициентов пропускания трассы T к рассчитанным коэффициентам пропускания T_p при суммарном ослаблении ($\alpha_n + \alpha_a$) близко к единице (таблица).

Отношения измеренного коэффициента пропускания трассы к расчетным коэффициентам пропускания

$I_{\text{ф}}, \text{ Вт/см}^2$	α_n/α_a	T	T/T_n	T/T_a	T/T_p
$1,5 \cdot 10^6$	2,941	0,83	0,955	0,871	1,001
$3,5 \cdot 10^6$	6,057	0,64	0,721	0,653	1,247
$5 \cdot 10^6$	6,235	0,65	0,732	0,662	0,746
$8,75 \cdot 10^6$	6,593	0,71	0,799	0,723	0,873
$3,5 \cdot 10^6$	0,529	0,43	0,485	0,796	0,609

При сохранении величин $\alpha_n \approx 0,212$ и $\alpha_a \approx 0,034 \text{ км}^{-1}$ ($\alpha_n/\alpha_a \approx 6$) и увеличении значений интенсивности лазерного излучения в фокальной области I_ϕ наблюдается соответствующий рост отношения T к коэффициенту пропускания T_n трассы, инициированному молекулярным поглощением. Подобным образом выглядит и отношение T к коэффициенту пропускания T_a трассы при аэрозольном ослаблении, в то время как T/T_p ведет себя очень разнообразно. При одинаковых $I_\phi = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$, но увеличенных $\alpha_a = 0,406 \text{ км}^{-1}$ видно резкое падение отношения T/T_n ($\alpha_n = 0,215 \text{ км}^{-1}$), в то время как T/T_a изменяется не столь резко.

Таким образом, для импульсного CO_2 -лазера значения интенсивности излучения в фокальной области в большей степени определяются аэрозольным заполнением атмосферы. Натурные исследования влияния аэрозольного состава на ослабление мощного лазерного излучения достаточно подробно рассмотрены только для жидкокапельных аэрозольных сред (туманная дымка, туман, морось, дождь), включая лабораторные микрофизические исследования взаимодействия излучения как с отдельными частицами, так и с объемами пространства, заполненными жидкокапельным аэрозолем различного дисперсного состава [12].

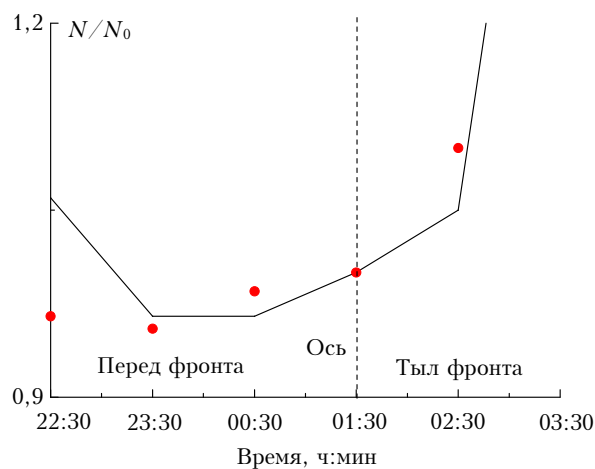
Для подробного анализа влияния мощного лазерного излучения на прозрачность атмосферы в условиях летних и осенних дымок желательна постоянная регистрация дисперсного состава этих образований, особенно его субмикронной фракции. В натурных исследованиях, как правило, применяется счетчик аэрозольных частиц типа АЗ-5, не обеспечивающий регистрацию субмикронной фракции. Нет и контролируемых лабораторных исследований по взаимодействию света с субмикронной фракцией.

Учитывая огромное разнообразие источников и стоков, химического состава частиц и высокую пространственно-временную изменчивость их свойств, можно сделать вывод [13], что сведения об оптических характеристиках аэрозоля и их трансформации под воздействием всего комплекса геофизических процессов на сегодняшний день могут быть получены только экспериментальным путем. Необходимо отметить развиваемые в этом направлении методы определения микрофизической основы частиц аэрозоля в контролируемых лабораторных условиях. Например, предложенный авторами [14] подход обеспечил с высокой точностью из оптических измерений восстановление истинного значения комплексного показателя преломления оптически активных частиц среднедисперсного диапазона размеров. Показано, что для корректного решения обратной задачи при старении смешанных дымов необходимо использовать только те значения комплексного показателя преломления, которые *соответствуют данному моменту времени*. Этот вывод очень созвучен результатам анализа, выполненного в [3].

Несмотря на несомненную актуальность, задача измерений распределения частиц аэрозоля по размерам с требуемой точностью еще далека от окончательного решения [15].

В рассматриваемой экспериментальной серии сопутствующие измерения дисперсного состава аэрозоля велись с интервалом 1 ч начиная с 22:30 местного времени. В [5, рис. 1] показано, что максимум функции распределения частиц по размерам постепенно смещается в область мелкодисперсного аэрозоля. Замеры, выполненные в 01:30, подтвердили его значительное увеличение в диапазоне радиусов 0,2–0,6 мкм. В это время исчезли плазменные образования на трассе распространения лазерного излучения. Это явление можно объяснить только приходом новой воздушной массы, что коррелирует с порывами ветра от 3 до 6 м/с. В последующий период скорость ветра была преимущественно 2 м/с. В соответствии с работой [16] подобную ситуацию можно объяснить фронтальным разделом.

Поскольку во всех известных публикациях по распространению мощного лазерного излучения нет даже упоминаний о подобных явлениях, естественно, что в данной серии измерений более тщательного отслеживания (увеличения числа замеров) аэрозольной обстановки не проводилось. Анализ архива приземных карт барической топографии показал, что примерно в 01:30 над районом измерений прошел холодный северо-западный фронт. Временное изменение счетной концентрации аэрозоля радиусом $\geq 0,2 \text{ мкм}$ для этого фронта иллюстрирует рисунок. Сплошная кривая – результат работы [16], точки – наши измерения. Предполагаемая ось фронта обозначена пунктирной линией.



Следуя [16], видим, что перед линией фронта концентрация аэрозоля начинает расти, но согласно вышеизложенному в этот период исчезли плазменные образования и значительно упала оптическая прозрачность трассы для CO_2 -лазера. Работы велись при наличии на трассе распространения туманной дымки. В отдельные периоды наблюдалась слабая морось. Поскольку длина трассы была около 0,5 км, а аэрозольные измерения проводились в ее начале, нельзя быть уверенным в равномерном аэрозольном заполнении.

Используя эмпирическую модель эффективности передачи энергии мощного лазерного излучения на приземных трассах [12], можно уверенно выде-

лить два пуска – в 00:28 и 01:03 [5], когда при наличии на трассе плазменных образований в целом наблюдалось значительное «просветление» ($T/T_p = 1,51$ и $1,22$ соответственно). Можно предположить значительную неравномерность аэрозольного заполнения трассы либо наличие на трассе в момент этих пусков частиц аэрозоля другого микрофизического состава. Модель [12], полученная на основе многолетних измерений, указывает на то, что для туманной дымки реализованные в анализируемых измерениях плотности энергии лазерного излучения однозначно обеспечивают «замутнение» трассы. Но эта модель разрабатывалась с учетом возникновения плазменных образований, а в данном случае «замутнение» гораздо значительнее при их отсутствии. Для наблюдаемых периодов мороси энергетическая наполненность пучка лазерного излучения, согласно [12], уверенно обеспечивает «просветление».

Таким образом, аномальная ситуация, описанная в [5], может быть обусловлена резкой сменой воздушной массы при прохождении холодного фронта. Следуя [16], можно предположить, что наиболее вероятное изменение аэрозольного заполнения произошло для субмикронной фракции. Точки наших измерений наиболее близки к кривой изменения счетной концентрации аэрозоля радиусом $\geq 0,2$ мкм [16]. При прохождении холодных фронтов наблюдается появление максимума концентрации среднедисперсной фракции на расстояниях около 100 км от линии фронта в его передней части. Именно там обычно выпадают осадки и происходит интенсивное вымывание частиц аэрозоля. В момент прихода в район измерений такой воздушной массы осадки перешли в слабую морось. Наши первые измерения аэрозоля в 22:30 как раз и захватили конец этого процесса аэрозольного очищения.

Не менее интересны и возможные изменения оптических характеристик частиц в поле излучения CO_2 -лазера, например индикатрисы рассеяния. Выше отмечалось, что результаты натурных исследований распространения мощного излучения CO_2 -лазеров в атмосфере носят уникальный характер. Этому определению полностью отвечает работа [17], в которой экспериментально получены значения показателя направленного рассеяния излучения CO_2 -лазера в диапазоне углов $7\text{--}65^\circ$ для различных сезонных и погодных условий. Авторы указывают на значительно бóльшую вытянутость индикатрисы рассеяния в направлении распространения лазерного пучка в сравнении с теоретическими моделями. Показано, что в отличие от видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра метеорологическая дальность видимости не позволяет удовлетворительно прогнозировать характеристики рассеяния в рассматриваемом диапазоне длин волн. Измерения выполнялись на трассах до 2,8 км для пучка излучения CO_2 -лазера диаметром 30 см, частоты следования импульсов излучения 20 Гц, длительности импульса 15–25 мкс, плотности энергии до $0,3$ Дж/см². Получено, что на временном отрезке 2-секундной дли-

тельности флуктуации показателя направленного рассеяния могут изменяться до 60% в сторону увеличения, а от импульса к импульсу на 25–30%.

Нет сомнения, что вывод [14] о необходимости определения оптических характеристик аэрозоля именно на момент пуска излучения является основополагающим для развития методов прогноза распространения мощного лазерного излучения в условиях реальной атмосферы и должен учитываться при комплектовании соответствующих систем [4].

Выяснение возможных причин уменьшения коэффициента пропускания атмосферы после прохождения холодного фронта требует соответствующих экспериментальных исследований.

Автор выражает глубокую признательность Татьяне Михайловне Рассказчиковой за помощь в определении времени прохождения холодного фронта через район измерений.

1. 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.
2. Аксенов В.П., Банах В.А., Валув В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смалихо 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.
3. Погодаев В.А. Прозрачность приземной атмосферы для излучения импульсного CO_2 -лазера: условия стабильности коэффициента пропускания // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 10. С. 1133–1138.
4. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Погодаев В.А., Цвык Р.Ш. Измерительные комплексы для исследования распространения лазерного излучения на атмосферных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 1010–1017.
5. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Пространственная самокоррекция пятнистой структуры излучения мощных импульсных лазеров при оптическом пробое на атмосферных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 9. С. 809–815.
6. Котюк А.Ф., Кузнецов А.А. Классификация средств измерений пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения // Метрологическое обеспечение пространственно-энергетической фотометрии. М.: Радио и связь, 1987. С. 5–21.
7. Ахтырченко Ю.В., Беляев Е.Б., Высокцкий Ю.П., Гарин О.В., Годлевский А.П., Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Куряпин А.И., Погодаев В.А., Покасов Вл.В. Нелинейное энергетическое ослабление излучения импульсного CO_2 -лазера в приземной атмосфере // Изв. вузов. Физ. 1983. Т. 26, № 2. С. 5–13.
8. 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.
9. Филитов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. Казань: КГУ, 1986. 157 с.
10. Мицель А.А., Пономарев Ю.Н. Оптические модели молекулярной атмосферы для лазерного излучения. Новосибирск: Наука, 1988. 128 с.
11. Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н., Тихомиров Б.А. Нелинейная оптико-акустическая спектроскопия молекулярных газов. Новосибирск: Наука, 1987. 128 с.

12. Бочкарев Н.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Оперативная оценка ослабления мощного излучения импульсного CO₂-лазера на приземных атмосферных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 11, № 7. С. 700–707.
13. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
14. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897.
15. Матвиенко Г.Г., Погодаев В.А. Оптика атмосферы и океана — неоконченный урок взаимодействия оптического излучения со средой распространения // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 5–10.
16. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Воронцова Е.В., Задде Г.О., Рассказчикова Т.М., Семьянова И., Скляднева Т.К. Динамика аэрозоля при прохождении атмосферных фронтов // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 7. С. 813–819.
17. Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Исследование рассеяния излучения CO₂-лазера в атмосфере // Оптический журнал. 1997. Т. 64, № 9. С. 24–28.

V.A. Pogodaev. The effect of a frontal zone on atmospheric transparency for high-energy laser beams.

Atmospheric transmission for high-power laser pulse radiation under the conditions of passing through a region of measurements of atmospheric cold front is analyzed. It is noted that for the forecast estimations of such radiation transmission it is necessary to record an aerosol component including submicrometer fraction directly before start of radiation.