

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42

**В.А. Погодаев**

### ПРОЗРАЧНОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

Представлены результаты анализа данных натурных исследований по ослаблению интенсивного лазерного излучения в различных оптико-метеорологических ситуациях. Установлено существенное влияние на величину ослабления соотношения между газовой и аэрозольной составляющими коэффициента ослабления атмосферы.

Первые результаты по экспериментальному исследованию прохождения пучков интенсивного излучения CO<sub>2</sub>-лазера на приземных трассах показали, что его начальные параметры претерпевают значительные искажения [1–4], вызываемые взаимодействием интенсивного лазерного излучения (ИЛИ) с компонентами среды распространения, изменением их оптических свойств и, как следствие, влиянием измененных оптических свойств среды на условия распространения лазерных пучков [5]. Разнообразие процессов взаимодействия ИЛИ с различными компонентами атмосферы в зависимости от параметров излучения, их мультипликативность [6, 7], зависимость ослабления среды от метеоусловий и значительность диапазона изменения его [8], наличие неравномерного вклада газовой и аэрозольной составляющих ослабления при одном и том же значении полного коэффициента ослабления, значительный разброс экспериментальных данных по коэффициенту пропускания ИЛИ с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм, полученных на натурных трассах, – все это значительно затрудняет интерпретацию результатов натурных исследований.

На интересующей нас длине волны спектральное пропускание излучения регламентируется одновременно двумя наиболее изменчивыми компонентами атмосферы – водяным паром и аэрозолями. Разделение влияния этих факторов на конечный результат затруднено, с одной стороны, перекрытием их вкладов в ослабление, с другой – зависимостью аэрозольного ослабления от атмосферной влажности.

В настоящем сообщении предпринята попытка выделить некоторые индикаторные характеристики процесса взаимодействия ИЛИ с приземной атмосферой, позволяющие при фиксированных исходных параметрах (тип излучения, его энергетика, оптико-метеорологические условия) оценить влияние газовой и аэрозольной составляющих ослабления на коэффициент пропускания ИЛИ. Практический интерес представляет анализ совместного влияния отношения  $\eta = \alpha_m / \alpha_a$ , энергетика излучения и геометрии пучка на трассе распространения. Здесь  $\alpha_m = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{CO}_2}$  ( $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$  – коэффициент континуального поглощения излучения с  $\lambda = 10,6$  мкм парами воды,  $\alpha_{\text{CO}_2}$  – коэффициент резонансного поглощения излучения углекислым газом);  $\alpha_a$  – коэффициент аэрозольного ослабления излучения.

Газовая составляющая объемного коэффициента ослабления имеет известную функциональную связь с температурой, давлением и содержанием поглощающих газов и рассчитывалась по методике оценки характеристик молекулярного поглощения [9]. Определение аэрозольного ослабления атмосферы проводилось в соответствии с [8]. Величины  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\alpha_{\text{CO}_2}$  и  $\alpha_a$  определялись по измеренным для каждого пуска ИЛИ значениям стандартных метеопараметров.

Пример зависимости коэффициента пропускания  $T_3$  приземным слоем атмосферы интенсивного излучения  $\text{CO}_2$  - лазера микросекундной длительности от газовой и аэрозольной составляющих объемного коэффициента ослабления  $\alpha$  показан в табл. 1.

Таблица 1

Влияние соотношения газовой и аэрозольной составляющих объемного коэффициента ослабления атмосферы на коэффициент пропускания ИЛИ

Время года	Параметры												
	$f$ , %	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$S_m$ , км	$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ , км <sup>-1</sup>	$\alpha_{\text{CO}_2}$ , км <sup>-1</sup>	$\alpha_m$ , км <sup>-1</sup>	$\alpha_a$ , км <sup>-1</sup>	$\alpha$ , км <sup>-1</sup>	$T_p$	$E_0$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\eta$	$T_3$
Зима	88	2,2	-8,8	4,9	0,022	0,039	0,061	0,322	0,383	0,81	0,19	0,19	0,61
Лето	93	9,74	11,7	5,1	0,164	0,065	0,229	0,133	0,362	0,82	0,2	1,72	0,75

Выбраны пуски ИЛИ с примерно равными плотностями энергии  $E_0$  в начале трассы распространения при близких значениях коэффициента пропускания  $T_p$ , рассчитанного для случая линейного распространения излучения с  $\lambda = 10,6$  мкм по [8, 9]. Измерения выполнены в различные сезоны года при одном типе оптической погоды (дымка весны и осени), но при различных значениях  $\eta$ . Некоторые из измеряемых метеопараметров приведены в таблице:  $f$  – относительная влажность воздуха;  $\rho$  – абсолютная влажность;  $t$  – температура;  $S_m$  – метеорологическая дальность видимости. Сохранялась геометрия пучка излучения ( $F/R_1 \sim 9 \cdot 10^2$ ). Здесь  $F$  – фокусное расстояние передающего зеркального телескопа, формирующего пучок ИЛИ с начальным радиусом  $R_1$ . Видно, что условия пропускания ИЛИ заметно отличаются, причем летние условия с повышенным влагосодержанием в данной ситуации предпочтительнее.

Диапазоны изменения величины  $\eta$ , реализованные при проведении измерений для конкретных аэрозольных условий на трассе распространения, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменчивость  $\eta$  для различных сезонов года

Тип оптической погоды	Сезон года			
	Зима	Весна	Лето	Осень
Дымка	0,19–0,98	0,69–1,95	3,0–10,43	0,31–9,65
Туманная дымка	0,07–0,08		0,42–0,84	0,06–0,65
Адвективный туман		0,01–0,1	0,03–0,05	0,02–0,04
Морось		0,08–0,18		0,6

Анализ влияния на коэффициент ослабления ИЛИ  $\alpha_n$  газовой и аэрозольных составляющих атмосферы велся на основе фактического материала, полученного при выполнении натурных экспериментов [1, 3, 7]. Некоторые результаты анализа представлены на рис. 1. Отчетливо выделяется влияние геометрии пучка ИЛИ, что связано с существенным повышением плотности энергии излучения при построении на трассе распространения более короткофокусного пучка. Достаточно сказать, что при  $F/R_1 \sim 9 \cdot 10^2$  и  $E_0 = 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> уже на значительном участке трассы наблюдается образование очагов оптического пробоя, влияющих на прозрачность атмосферного канала [1, 3, 7]. Для  $F/R_1 \sim 2,4 \cdot 10^3$  условия оптического пробоя на трассе не реализуются. В этом случае зависимость  $\alpha_n(E_0)$  значительно сложнее. При фиксированном  $E_0$  зависимость  $\alpha_n(\eta)$  не является монотонной.

Интересным результатом проведенного анализа является слабая зависимость  $\alpha_n(E_0)$  при  $\eta \sim 1$  и  $F/R_1 \sim 2,4 \cdot 10^3$ . Если при  $\eta = 1$  наблюдается слабая немонотонность зависимости  $\alpha_n(E_0)$ , то начиная с  $\eta = 1,2$  до  $\eta = 1,5$ ,  $\alpha_n$  линейно зависит как от  $E_0$ , так и от  $\eta$ . Этот небольшой диапазон изменения величины  $\eta$  показывает чувствительность  $\alpha_n$  к колебаниям  $\alpha_m$  и  $\alpha_a$ .

Рассмотрим поведение зависимости  $\alpha_n(E_0)$  для  $F/R_1 \sim 9 \cdot 10^2$  при преобладании аэрозольного ослабления излучения. Вид зависимости  $\alpha_n(E_0)$  представлен на рис. 2. Для фиксированного

сированной величины  $\alpha_m \approx 0,08 \text{ км}^{-1}$  условия на трассе распространения характеризуются разнообразием аэрозольной компоненты: дождь, снег, зимняя дымка, туманная дымка. Различие в ходе зависимостей  $\alpha_n(E_0)$  на рис. 1 и 2 вызвано тем обстоятельством, что данные, приведенные на рис. 1, получены осреднением  $\alpha_n$  для конкретного значения  $\eta$  и типа оптической погоды при любых реализуемых в экспериментах  $\alpha_m$  и  $\alpha_a$ .

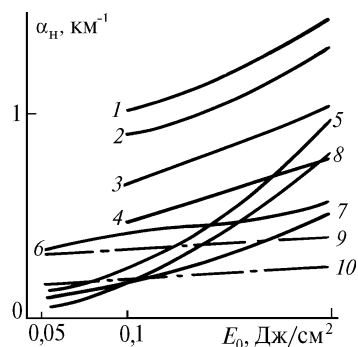


Рис. 1. Коэффициент ослабления ИЛИ на приземной трассе для различной геометрии пучка излучения в зависимости от плотности энергии в начале трассы и значений  $\eta = 0,5$  (кривые 1,5); 1,0 (2,6); 2,0 (3,7); 3,0 (4,8); 1,2 (9); 1,5 (10);  $F/R_1 \sim 9 \cdot 10^2$  (1-4);  $2,4 \cdot 10^3$  (5-10). Тип оптической погоды: дымка весны и осени

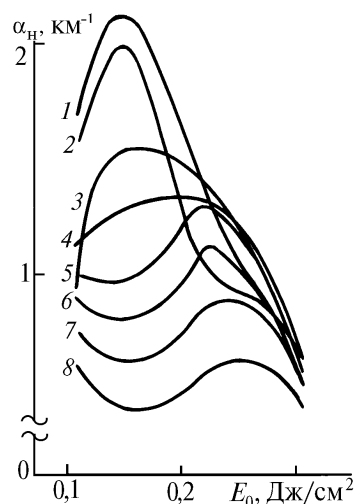


Рис. 2. Влияние на зависимость  $\alpha_n(E_0)$  аэрозольной обстановки на трассе распространения ИЛИ:  $F/R_1 \sim 9 \cdot 10^2$ ;  $\alpha_m \approx 0,08 \text{ км}^{-1}$ ; 1, 2 – дождь,  $\eta \approx 0,1$  и  $0,11$  соответственно; 3, 4 – снег,  $\eta \approx 0,13$  и  $0,15$ ; 5, 6 – зимняя дымка,  $\eta \approx 0,19$  и  $0,25$ ; 7, 8 – туманная дымка,  $\eta \approx 0,36$  и  $0,67$

Основными механизмами взаимодействия ИЛИ со средой распространения, регулирующими условия пропускания лазерного излучения, являются: поглощение в газах и поглощение в аэрозолях, обеспечивающее испарение и взрыв водных частиц, изменяющих свои оптические свойства, а также нагрев, плавление твердых частиц и соответствующее изменение их оптических свойств и окружающего частицу газа. Твердые аэрозольные конгломераты при этом распадаются на большое количество вторичных частиц малого размера [10]. Оптико-метеорологические ситуации, соответствующие времени проведения экспериментов, определяют основные процессы, происходящие при взаимодействии ИЛИ с аэрозольными частицами. При достижении на значительном участке трассы условий, необходимых для взрыва капель дождя [11], они дробятся на активные вторичные частицы, размер которых, а следовательно, и влияние на  $T_s$  уменьшаются при увеличении энергии импульса ИЛИ [4]. Для оптико-метеорологической ситуации, соответствующей снегопаду, требуется некоторое время для

трансформации снежинок в капли с последующим дроблением, что снижает общее за импульс нелинейное ослабление ИЛИ.

При реализуемых в экспериментах параметрах излучения и влажности воздуха вклад в  $\alpha_n$  ослабления на очагах оптического пробоя составляет  $\sim 0,6-0,8 \text{ км}^{-1}$ .

Отсутствие на трассе распространения крупных частиц осадков (кривые 5–8, рис. 2) поясняет смещение максимума кривых в область повышенной энергетики. Падение  $\alpha_n$  с ростом  $E_0$  происходит за счет испарения жидкой фазы. Расчеты показали, что повышение  $E_0$  вплоть до  $0,15 \text{ Дж/см}^2$  увеличивает прозрачность приземного канала распространения ИЛИ в условиях влажных дымок приблизительно на 10%. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментом. После испарения водной оболочки развиваются плазменные очаги на твердых ядрах аэрозольных частиц. Одновременно повышение энергетики обеспечивает взрыв в режиме дробления мелких капель и обводненных конгломератов, что проявляется в виде некоторого максимума для  $\alpha_n$ .

Уменьшение ослабления ИЛИ может быть вызвано и зависимостью  $\alpha_{\text{CO}_2}$  и  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$  от энергетики излучения. Причиной существования такой зависимости являются два эффекта [6]:

– эффект насыщения поглощения колебательно-вращательных переходов в атмосферном  $\text{CO}_2$ , характеризующийся пороговой интенсивностью  $I \sim (0,2 \div 0,5) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ ;

– эффект просветления далекого крыла полосы  $010 \text{ H}_2\text{O}$  с пороговой интенсивностью  $I \sim (2 \div 3) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ . Оценки вклада указанных эффектов в ход зависимости  $\alpha_n(E_0)$  для рассматриваемых оптико-метеорологических ситуаций показали его незначительность.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Существенная зависимость  $\alpha_n(\eta)$  при фиксированных параметрах ИЛИ указывает на то, что при разработке моделей переноса ИЛИ в реальной атмосфере нельзя ограничиваться аддитивным рассмотрением его взаимодействия с газовой и аэрозольной компонентами. Процессы взаимодействия протекают одновременно, обогащая друг друга и конкурируя.

2. Для слабофокусированных пучков с  $E_0 = 0,1 \div 0,2 \text{ Дж/см}^2$  при реализации на трассе оптической погоды типа дымка весны и осени наиболее устойчивый прогноз пропускания атмосферой ИЛИ возможен при равенстве ослабления газовой и аэрозольной компонент. Увеличение вклада той или другой компоненты в исходный коэффициент ослабления излучения вносит заметную неоднозначность в оценку ослабления ИЛИ атмосферной трассой. Для острофокусированных пучков с той же плотностью энергии величина ослабления значительно выше и однозначно зависит от величины  $\eta$ . Основной вклад в ослабление вносит аэрозольная компонента.

3. Для детального анализа взаимосвязанных процессов взаимодействия газовой и аэрозольных компонентов с ИЛИ необходимо проводить экспериментальные исследования по распространению ИЛИ в открытой атмосфере с использованием быстродействующих блоков газоанализа и микроструктуры аэрозоля непосредственно в канале распространения.

1. Ахтырченко Ю.В., Беляев Е.Б., Высоцкий Ю.П. и др. // Изв. вузов. Физика. 1983. N 2. С. 5–13.
2. Ахтырченко Ю.В., Высоцкий Ю.П., Голуб С.Л. и др. // Труды ИЭМ: Распространение оптического излучения в атмосфере. 1986. Вып. 40 (123). С. 99–103.
3. Копытин Ю.Д., Коханов В.И., Погодаев В.А., Шишигин С.А. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. N 2. С. 405–411.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Погодаев В.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 9. С. 948–953.
5. Зуев В.Е., Землянов А.А., Копытин Ю.Д. Нелинейная оптика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 256с.
6. Мицель А.А., Пономарев Ю.Н. Оптические модели молекулярной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1988. 127 с.
7. Землянов А.А., Мальцева Г.А., Погодаев В.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 6. С. 609–614.
8. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. // ДАН СССР. 1982. Т. 265. N 6. С. 1353–1356.
9. Блаховская Т.В., Мицель А.А. // Распространение лазерного излучения в поглощающей свет среде. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. С. 67–80.
10. Букатый В.И., Погодаев В.А., Чапоров Д.П. // Прикладная механика и техническая физика. 1979. N 1. С. 30–34.

11. Погодаев В. А., Рождественский А. Е., Чистякова Л. К. // Изв. вузов. Физика. 1980. № 3. С. 34–39.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
30 декабря 1992 г.

**V. A. Pogodaev. Transmittance of the Near Ground Atmosphere for a Pulsed CO<sub>2</sub> - laser.**

Analysis of the data of field investigations of a high-power laser radiation in different optical and meteorological situations is carried out. An essential influence of the molecular- to- aerosol components of the atmospheric extinction coefficient on the extinction itself has been revealed.