

Е.Р. Милотин, А.И. Сербин, Ю.И. Яременко

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРАССАХ

Анализ экспериментальных данных ослабления излучения лазера с $\lambda = 10,6$ мкм в атмосфере позволил установить вид функций распределения прозрачности атмосферы для этой длины волны, которые сопоставляются с аналогичными зависимостями для $\lambda = 0,55$ и $1,06$ мкм.

Атмосферные лазерные системы (АЛС) различного назначения все более широко используются в народном хозяйстве [1]. Эффективность действия АЛС во многом определяется состоянием атмосферы. Это обстоятельство послужило одной из причин интенсивной разработки методов прогнозирования «оптической погоды» [2], важной характеристикой которой является коэффициент прозрачности атмосферы T , служащий исходной величиной для расчета надежности работы АЛС [3] и непосредственно связанный с показателем ослабления лазерного излучения.

Как известно [4], эта связь, на длине волны $0,55$ мкм определяется соотношением:

$$T(0,55) = \exp[-\alpha(0,55)L] = \exp\left(-\frac{3,91}{S_m}L\right), \quad (1)$$

где S_m — метеорологическая дальность видимости; L — длина трассы; $\alpha(0,55)$ — показатель ослабления излучения.

Для волн ближнего ИК-диапазона, лежащих в спектральных окнах прозрачности атмосферы, подобная зависимость, обусловленная, главным образом, рассеянием излучения, может быть представлена в виде [4]:

$$T(\lambda) = \exp\left[-L \frac{3,91}{S_m} \left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^q\right], \quad (2)$$

где $q = 0,585S_m^{1/3}$ для $S_m \leq 6$ км, $q = 1,3$ для $S_m > 6$ км, λ — длина волны.

Из соотношения (1) и (2) следует, что изучение временных вариаций и статистических характеристик S_m весьма важно. Подобные исследования, основанные на данных многолетних наблюдений S_m , были выполнены для ряда географических регионов [5–7]. Для Ленинградской области на основе полученных закономерностей для S_m были установлены законы распределения непосредственно для коэффициента прозрачности атмосферы на $\lambda = 0,55$ и $1,06$ мкм, которые хорошо аппроксимировались модифицированным распределением Вейбулла при длинах трасс более 5 км [8].

Однако применение соотношения (2) для среднего ИК-диапазона приводит к значительным ошибкам в величинах ослабления излучения [9]. Поэтому для получения статистических характеристик коэффициента прозрачности атмосферы на $\lambda = 10,6$ мкм были использованы данные экспериментальных исследований ослабления излучения CO_2 -лазера, выполненных в Ленинградской области [10]. Поскольку во всем диапазоне измеренных значений показателя ослабления выполнялся экспоненциальный закон, то было проведено сопоставление законов распределения прозрачности атмосферы для видимого и ИК-диапазонов при различных длинах трасс.

Для измерений ослабления излучения CO_2 -лазера в атмосфере использована инфракрасная атмосферная установка ИКАУ-1 [11], основу которой составляет многоходовая оптическая система. Такая система позволяет путем многократных отражений получить на стометровой однородной горизонтальной базе набор трасс длиной от 400 до 4000 м.

Методика проведения рассматриваемых измерений подробно изложена в [11], эксперименты проводились в течение 3-х лет в различные сезоны года. Всего было получено 19062 отсчетных точек за общее время записей 170 часов, причем время проведения непрерывного сеанса изменялось от 30 мин до 6 ч в зависимости от конкретной ситуации на трассе и условий работы аппаратуры. Весь массив данных был получен практически для 3-х линий спектра излучения CO_2 -лазера: P_{20} , P_{22} , P_{24} .

Как известно [12], показатель ослабления излучения CO_2 -лазера определяется суммой вкладов молекулярного поглощения в атмосферном углекислом газе α_{CO_2} и линиях H_2O , поглощения в континууме водяного пара $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ и аэрозольного ослабления α_a . Оценка вклада селективного поглощения

линиями H₂O, выполненная авторами данной статьи, показала, что он составляет не более 5% от вклада CO₂ и при дальнейших выкладках этот эффект не учитывался. Вклад молекулярного поглощения в атмосферном CO₂ оценивался на основе измерений концентрации CO₂ аналитическим газоанализатором, которая в ходе проведения опытов составляла (330±5) млн⁻¹. Значение α_{CO₂} для основной линии генерации P₂₀ CO₂-лазера определялось по приближенной формуле [13]

$$\alpha_{\text{CO}_2} \simeq \frac{6,36 \cdot 10^5}{\theta^{3/2}} \exp\left(-\frac{2230}{\theta}\right), \quad (3)$$

где θ — температура воздуха в кельвинах.

Тогда показатель непрерывного ослабления есть разность значений экспериментально полученного полного ослабления и вычисленного α_{CO₂}

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{эксп}} - \alpha_{\text{CO}_2} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{a}}. \quad (4)$$

Для выделения из α_Σ чисто аэрозольного ослабления показатель поглощения в континууме водяного пара рассчитывался по известной формуле Берча [14]

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(10,6) = 0,177 \frac{p^2}{\theta} \exp\left(\frac{1745}{\theta} - \frac{1745}{296}\right), \quad (5)$$

где p — парциальное давление водяного пара, гПа; α_{H₂O} в км⁻¹.

Большая часть экспериментальных данных (18387 отсчетов) получена в условиях дымки различной плотности. Из полного массива данных на основе их априорного разделения [15] по диапазонам изменения парциального давления водяного пара p, относительной влажности f и S_м были сформированы 11 множеств (ансамблей), для которых в процессе предварительной статистической обработки были рассчитаны средние значения показателей ослабления лазерного излучения и метеопараметров, их средние квадратические отклонения (табл. 1), а также коэффициенты корреляции между ними (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что для всех ансамблей наиболее высок коэффициент корреляции R_{pα_Σ}, что свидетельствует о значительном влиянии континуума водяного пара на ослабление излучения CO₂-лазера, тогда как показатель аэрозольного ослабления мало связан с давлением водяного пара.

Можно отметить также физически объяснимую тенденцию увеличения α_а при уменьшении S_м, а также уменьшение коэффициентов корреляции R_{S_мα_Σ} и R_{S_мα_а} а при увеличении парциального давления водяного пара, т. е. вклад аэрозольного ослабления в полное ослабление более заметен при малых значениях парциального давления водяного пара.

Данные табл. 2 показывают, что после вычитания α_{H₂O} корреляционные связи α_а с S_м становятся достаточно значимыми, давая тем самым возможность применения S_м при оценках α_а в длинноволновом окне прозрачности атмосферы. Для этого целесообразно ввести коэффициент A, связывающий α_а и S_м:

$$\alpha_{\text{a}} = \frac{A}{S_{\text{м}}}. \quad (6)$$

Из экспериментальных данных получены следующие значения A: для летних дымок A = 0,28, для зимних дымок A = 0,98.

Хотя при изменении S_м коэффициент A может изменяться (например, по нелинейному закону [16]), однако значительный разброс экспериментальных значений α_а приводит к тому, что на практике при количественных оценках характеристик ослабления лазерного ИК-излучения можно использовать средние значения показателя ослабления.

Приведенные результаты дают отдельные статистические характеристики α_Σ и α_а, но, как отмечалось выше, для прогнозирования надежности непрерывной работы АЛС необходимы обобщающие статистические закономерности состояния среды распространения сигналов. Для этого полученные экспериментальные данные α_Σ и α_а целесообразно связать с коэффициентом прозрачности атмосферы T и получить законы распределения этой величины. Поэтому дальнейшей статистической обработке с помощью ЭВМ подвергались массивы данных коэффициента прозрачности атмосферы, связанного с показателем ослабления а законом Бугера:

$$T = \exp(-\alpha L).$$

Обработка выполнялась по методике, разработанной в [5, 7, 8] с анализом следующих видов распределений: усеченного Вейбулла, модифицированного арксинуса, усеченного экспоненциального, усе-

ченного Рэля, усеченного Максвелла, усеченного нормального, бета-распределения и усеченного логарифмически нормального с учетом того обстоятельства, что случайная величина T может принимать значения от 0 до 1.

Таблица 1

Статистические характеристики параметров ансамблей данных

Номер множества	Интервал выборок фиксированного параметра	Средние значения и средне-квадратические отклонения параметров								Средние значения и средние квадратические отклонения показателей ослабления			
		$\bar{\theta}$, °C	σ_{θ}	\bar{P} , гПа	σ_P	\bar{f} , %	σ_f	S_M , км	σ_{S_M}	$\bar{\alpha}_{\Sigma}$, км ⁻¹	$\sigma_{\alpha_{\Sigma}}$	$\bar{\alpha}_a$, км ⁻¹	σ_{α_a}
Выборки по ρ (гПа)													
I	<5	0,6	2,2	4,5	0,3	71,5	8,1	17	12	0,09	0,05	0,07	0,05
II	5—10	6,0	5,7	6,7	1,3	74,5	8,6	15	6	0,12	0,06	0,08	0,05
III	10—15	17,9	3,8	12,9	1,3	64,5	6,3	31	7	0,18	0,09	0,06	0,08
IV	>15	23,1	2,3	17,0	0,9	60,4	7,1	25	11	0,20	0,03	0,02	0,02
Выборки по f (%)													
V	50—70	11,5	8,8	9,6	5,2	61,1	3,2	26	9	0,13	0,07	0,05	0,04
VI	70—90	1,5	10,5	6,6	4,6	78,3	4,6	17	5	0,12	0,05	0,07	0,04
VII	90—100	-2,3	8,6	5,7	3,0	94,4	2,2	8	6	0,15	0,06	0,11	0,04
Выборки по S_M (км)													
VIII	лето 10—20	12,8	6,9	12,5	2,8	84,7	8,3	18	2	0,22	0,03	0,10	0,05
IX	20—100	14,7	6,4	11,1	3,8	63,4	12,1	35	11	0,13	0,06	0,04	0,03
X	зима 1—10	-0,6	9,6	5,5	3,8	83,0	4,6	7	3	0,14	0,06	0,10	0,04
XI	10—20	-1,9	3,7	4,2	0,9	74,7	8,2	13	2	0,09	0,02	0,07	0,02

Таблица 2

Коэффициенты корреляции параметров

Номер множества	Коэффициенты корреляции							
	$R_{f\theta}$	R_{fP}	$R_{P\alpha_{\Sigma}}$	$R_{\theta\alpha_{\Sigma}}$	$R_{P\alpha_a}$	$R_{f\alpha_a}$	$R_{S_M\alpha_{\Sigma}}$	$R_{S_M\alpha_a}$
I	-0,88	-0,004	0,33	-0,26	0,30	0,46	-0,69	-0,69
II	-0,86	-0,14	0,46	-0,27	0,02	0,50	-0,59	-0,68
III	-0,93	0,45	0,48	-0,42	-0,10	0,32	-0,53	-0,61
IV	-0,89	0,07	0,60	-0,28	0,21	0,52	-0,40	-0,23
V	0,09	0,32	0,79	0,66	-0,40	-0,009	-0,28	-0,75
VI	-0,53	-0,31	0,71	0,70	-0,52	-0,07	-0,47	-0,70
VII	0,65	0,63	0,60	0,53	0,13	0,50	-0,30	-0,09
VIII	-0,94	-0,82	0,28	-0,22	-0,77	0,82	-0,43	-0,50
IX	-0,29	0,34	0,83	0,51	0,04	0,25	-0,39	-0,73
X	-0,50	-0,23	0,70	0,55	-0,17	0,17	-0,36	-0,34
XI	-0,17	0,41	0,27	-0,39	-0,52	-0,05	-0,28	-0,34

Для различных гипотетических длин трасс, выбранных аналогично [8] ($L = 1, 5, 10, 20, 50$ км) были вычислены на ЭВМ статистические характеристики коэффициента прозрачности атмосферы: средняя величина \bar{m}_T , дисперсия D_T , несмещенные и состоятельные оценки третьего $\bar{\mu}_3$ и четвертого $\bar{\mu}_4$ центральных выборочных моментов величины T . Поскольку для установления наилучшей аппроксимации реальных распределений коэффициента прозрачности использовалась система распределений Пирсона, то рассчитывались параметры этой системы $\bar{\beta}_1 = \bar{\gamma}_1^2$ и $\bar{\beta}_2 = \bar{\gamma}_2 + 3$, где $\bar{\gamma}_1 = \bar{\mu}_3 \bar{D} \bar{r}^{3/2}$ — коэффициент асимметрии $\bar{\gamma}_2 = \bar{\mu}_4 \bar{D} \bar{r}^2 - 3$ — коэффициент эксцесса.

Статистические характеристики коэффициента прозрачности атмосферы для $\lambda = 10,6$ мкм с учетом суммарного ослабления

$L, \text{ км}$	\bar{m}_T	\bar{D}_T	$\bar{\mu}_3$	$\bar{\mu}_4$	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_2$	$\frac{\bar{m}_T}{\sqrt{\bar{D}_T}}$
1	$8,54 \cdot 10^{-1}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$-1,08 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10$	18,65	24,44	6,29
5	$5,20 \cdot 10^{-1}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$-2,00 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10$	0,103	3,44	2,82
10	$2,64 \cdot 10^{-1}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10$	0,741	2,73	1,57
20	$9,86 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$	$8,85 \cdot 10$	2,52	4,75	0,844
50	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$9,91 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10$	14,18	21,48	0,424

В табл. 3 приводятся статистические характеристики коэффициента прозрачности атмосферы, вычисленные с учетом суммарного ослабления в континууме водяного пара и аэрозоле (т. е. для α_Σ), а экспериментальные и теоретические функции распределения $F(T)$ коэффициента прозрачности атмосферы T для этого случая представлены на рис. 1.

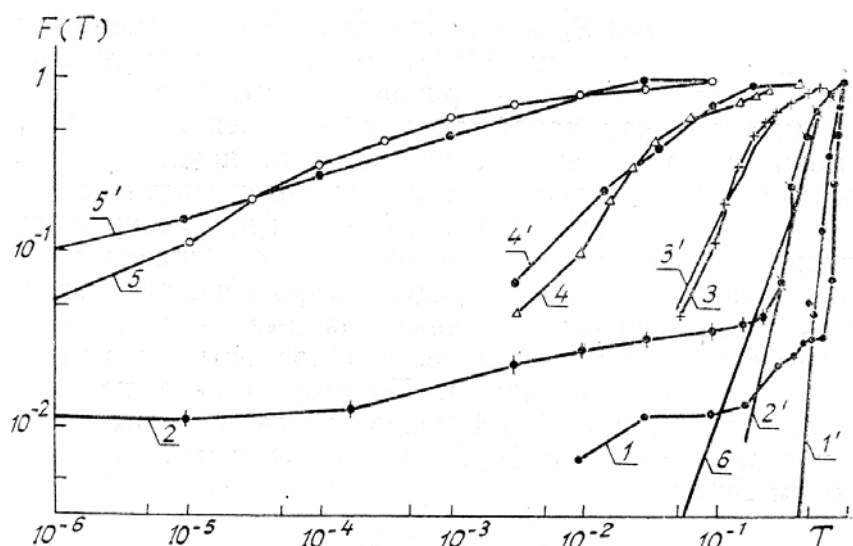


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические функции распределения прозрачности атмосферы для $\lambda = 10,6$ мкм с учетом суммарного ослабления. Расчет по экспериментальным данным: 1— $L = 1$; 2—5; 3—10; 4—20; 5—50 км. Теория: 1'—5'—гамма-распределение; 6—усеченное нормальное распределение

Анализ показал, что при $L = 10$ км наилучшей аппроксимацией эмпирических распределений коэффициента прозрачности атмосферы является усеченное гамма-распределение (кривые 1', 2', 3', 4', 5' на рис. 1).

При $L = 1$ и 5 км аппроксимация гамма-распределением может быть использована для оценочных расчетов при $T \geq 0,6$ и 0,3 соответственно. Необходимо отметить, что при $L = 5$ км усеченное гамма-распределение по своим параметрам (табл. 3) близко к нормальному (кривая 7), которое также может быть применено для аппроксимации эмпирического распределения.

Такому же статистическому анализу был подвергнут соответствующий массив данных коэффициента прозрачности, связанного с чисто аэрозольной компонентой ослабления — α_a . Статистические характеристики коэффициента прозрачности для этого случая приводятся в табл. 4 и на рис. 2.

Сопоставление данных табл. 3 и 4 показывает значительное расхождение всех статистических характеристик, особенно по мере увеличения длины трассы. В частности, характер изменения средней величины коэффициента прозрачности \bar{m}_T свидетельствует о заметной роли водяного пара в ослаблении излучения CO_2 -лазера.

Из результатов анализа следует, что наиболее хорошо отображает эмпирические распределения коэффициента прозрачности в случае аэрозольного ослабления при различных длинах трасс (начиная с $L \geq 5$ км) усеченное распределение Вейбулла (рис. 2). Такое же распределение хорошо описывает эмпирические изменения коэффициента прозрачности на $\lambda = 0,55$ и 1,06 мкм [8] для трасс длиннее 5 км.

Однако для среднего ИК-диапазона регулировочный параметр распределения Вейбулла $r \approx \frac{2\lambda}{Z}$ и отличается от значений r для видимого и ближнего ИК-диапазонов. Это отличие физически объясняется различным соотношением в этих диапазонах длины волны излучения и размеров аэрозолей.

Таблица 4

Статистические характеристики коэффициента прозрачности атмосферы для $\lambda = 10,6$ мкм с учетом только аэрозольного ослабления

$L, \text{ км}$	\bar{m}_T	\bar{D}_T	$\bar{\mu}_3$	$\bar{\mu}_4$	$\bar{\beta}_1$	β_2	$\frac{\bar{m}_T}{\sqrt{\bar{D}_T}}$
5	$7,04 \cdot 10^{-1}$	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$-1,83 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$6,44 \cdot 10^{-2}$	1,84	3,64
10	$5,35 \cdot 10^{-1}$	$7,04 \cdot 10^{-2}$	$9,61 \cdot 10^{-4}$	$7,73 \cdot 10^{-3}$	$2,63 \cdot 10^{-3}$	1,55	2,01
20	$3,59 \cdot 10^{-1}$	$8,72 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-1}$	1,56	1,21
50	$1,91 \cdot 10^{-1}$	$6,12 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$7,73 \cdot 10^{-2}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	2,06	7,72

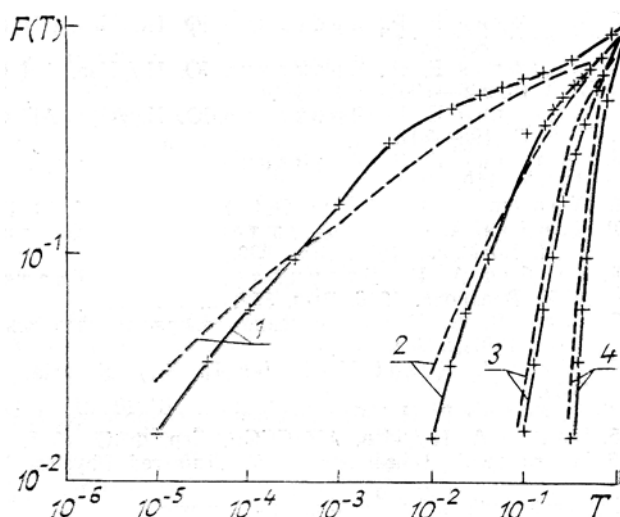


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические функции распределения прозрачности атмосферы для 10,6 мкм при аэрозольном ослаблении излучения: кривая 1— $L = 50$; 2—20; 3—10; 4—5 км. Сплошные линии — расчет по экспериментальным данным, штриховые — теория

Таким образом, по итогам работы можно сделать следующие выводы:

1. Установлены устойчивые корреляционные связи между факторами, определяющими состояние атмосферы, и ослаблением излучения на $\lambda = 10,6$ мкм.
2. Получены законы распределения коэффициента прозрачности атмосферы для $\lambda = 10,6$ мкм в Северо-Западном регионе ЕТС.
3. Показано, что усеченное распределение Вейбулла, хорошо аппроксимирующее эмпирическое распределение коэффициента прозрачности атмосферы в видимом и ближнем ИК-диапазонах, применимо и для описания распределения коэффициента прозрачности атмосферы в среднем ИК-диапазоне, обусловленного аэрозольным ослаблением излучения.

1. Казарян Р.А., Оганесян А.В., Погосян К.П., Милютин Е.Р. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу. М.: Радио и связь, 1985. 207 с.
2. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 201 с.
3. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Радиотехника. 1985. № 2. С. 11—18.
4. Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат, 1964. 463 с.
5. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 8. С. 883—886.
6. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 9. С. 998—1000.
7. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР Сер. ФАО. 1988 Т. 24. № 2. С. 198—204.
8. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Метеорология и гидрология. 1982. № 9. С. 108—110.
9. Woodman O. P. //Appl. Opt. 1974. V. 13. № 10. P. 2193—2195.
10. Сербин А.И., Броунштейн А.М., Казакова К.В. //Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1977. Вып. 393. С. 101—108.

11. Сербин А.И., Броунштейн А.М., Казакова К.В. //Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1976. Вып. 357. С. 187–193.
12. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
13. Abele J., Raidt H., Höhn D.H. //Opt. acta. 1980. V. 27. № 10. P. 1445–1464.
14. Арефьев В.Н. //Метеорология и гидрология. 1980. № 1. С. 97–112.
15. Чавро А.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 21. № 3. С. 270–276.
16. Warner J., Richard V.M. //Infrared Physics. 1979. V. 19. № 1. P. 15–18.

Ленинградский электротехнический институт связи
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Поступила в редакцию
25 февраля 1991 г.

E. R. Milyutin, A. I. Serbin, Yu. I. Yaremenko. Distribution Laws for the Atmospheric Transmission Coefficient in the IR for Horizontal Paths.

The analysis of experimental data on the extinction of radiation at $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ in the atmosphere allowed the determination of the atmospheric transmission distribution functions. These distribution functions are compared to similar dependences for radiation at $\lambda = 0.55$ and $1.06 \mu\text{m}$.