

Е.Р. Милотин, Ю.И. Яременко

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ВОЛН ВИДИМОГО И ИК-ДИАПАЗОНОВ

Установлены законы распределения коэффициента прозрачности атмосферы для волн видимого и ИК-диапазонов путем анализа экспериментальных данных ослабления излучения CO₂-лазера и метеорологической дальности видимости.

Эффективность использования атмосферных лазерных систем (АЛС) во многом определяется состоянием среды распространения оптического излучения. Это обстоятельство послужило одной из причин интенсивной разработки методов прогнозирования «оптической погоды» [1], определяющим составным элементом которой является коэффициент прозрачности атмосферы T , лежащий в основе расчета надежности работы АЛС [2].

Коэффициент прозрачности связан с показателем ослабления энергии оптической волны $\lambda = 0,55$ мкм соотношением

$$T(0,55) = \exp[-\alpha(0,55)L] = \exp\left(-\frac{3,9}{S_m}L\right), \quad (1)$$

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

Для волн ближнего ИК-диапазона, лежащих в «окнах прозрачности» атмосферы, подобная зависимость, обусловленная главным образом рассеянием излучения аэрозолями, может быть представлена в виде [3]

$$T(\lambda_i) = \exp\left[-L \frac{3,9}{S_m} \left(\frac{0,55}{\lambda_i}\right)^q\right], \quad (2)$$

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

Из соотношений (1) и (2) видна важность изучения статистических характеристик МДВ. Попытки таких исследований отражены в ряде работ (библиография в [4, 5]), однако вопрос о виде закона распределения МДВ и его зависимости от географического региона оставался открытым.

Авторы настоящей статьи исследовали временные статистические закономерности и установили вид законов распределения МДВ для следующих пунктов Европейской части СССР: Ленинграда, Ульяновска, Москвы, Одессы (названия пунктов приводятся в хронологической последовательности обработки наблюдений) [4–8]. В качестве исходных данных использовались многолетние наблюдения МДВ метеостанций аэропортов указанных городов. Объем выборки (общее число наблюдений) составил соответственно $n_1 = 122736$, $n_2 = 18922$, $n_3 = 87219$, $n_4 = 122567$. Все регистрируемые значения МДВ были разделены на 14 интервалов: 0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1,0; 1,0–1,2; 1,2–1,6; 1,6–2,0; 2,0–2,4; 2,4–3,2; 3,2–4,8; 4,8–8; ≥ 8 км. Такие градации S_m были выбраны в соответствии с рекомендациями Международной организации гражданской авиации (ИКАО) для того, чтобы в дальнейших исследованиях использовать данные метеостанций международных аэропортов, которые являются более точными и частыми по сравнению с наблюдениями обычных метеостанций, проводимыми лишь несколько раз в сутки. К тому же этот выбор интервалов является достаточно подробным и, следовательно, позволяет построить полигон накопленных частностей с точностью, приемлемой для практических расчетов, связанных с оценкой влияния среды распространения на параметры АЛС.

Для установления аналитического закона распределения МДВ были рассмотрены пять теоретических функций распределения (усеченное нормальное, логарифмически нормальное, Рэля, Райса, Джонсона) в том числе и те, которые применялись в ранее опубликованных исследованиях статистических характеристик МДВ [9–11].

Обработка результатов наблюдений S_m для первых двух, городов проводилась по методике, изложенной в [4]. Выяснилось, что в Ленинграде для зимних месяцев и для среднегодовых экспериментальных распределений МДВ наиболее хорошей аппроксимацией является распределение Рэля, тогда как для летних — Райса. В качестве аппроксимирующего распределения для всех месяцев было предложено модифицированное распределение Райса [4].

$$F(S_M) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{S_M} x \exp\left\{-\frac{x^2 + (am)^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{amx}{\sigma^2}\right) dx, \quad (3)$$

где $\sigma = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \bar{m}_{s_M}$, $\bar{m}_{s_M} = \bar{m}$ – среднее значение S_M ; $I_0(\cdot)$ – функция Бесселя; a – регулировочный параметр, причем $a = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{m}_{s_M} \geq 9 \text{ км} \\ 0 & \text{при } \bar{m}_{s_M} < 9 \text{ км} \end{cases}$, т.е. при наличии тяжелых для работы АЛС условий распределение (3) переходит в рэлеевское.

Наблюдения в Ульяновске [7] подтверждают выбор подобной аппроксимации для месячных распределений МДВ. Однако использование в последних двух городах для аппроксимации среднегодовых и большинства месячных эмпирических полигонов МДВ распределения (3) показало его непригодность. Применение других, перечисленных выше функций распределения также дало отрицательный результат. Поэтому была проведена дополнительная статистическая обработка данных, в рамках которой для аппроксимации использовалась система распределений Пирсона [12]. Подробный анализ [8] показал, что наилучшей аппроксимацией эмпирических полигонов для зимних месяцев во всех районах является модифицированное бета-распределение

$$F(S_M) = \int_0^{S_M/12} x^{c-1} (1-x)^{b-1} dx, \quad (4)$$

где c и b – параметры распределения,

$$c = \frac{\bar{m}_{s_M}}{12} \left[\frac{\bar{m}_{s_M} (12 - \bar{m}_{s_M})}{\bar{D}_{s_M}} \right], \quad b = \frac{c (12 - \bar{m}_{s_M})}{\bar{m}_{s_M}},$$

\bar{D}_{s_M} – дисперсия S_M , $S_M = 12$ км – принятая верхняя граница последнего интервала значений S_M . Среднегодовые полигоны для Москвы и Одессы также наилучшим образом аппроксимируются бета-распределением. Среднегодовые же полигоны для Ленинграда и Ульяновска, а также полигоны для летних месяцев во всех городах аппроксимируются модифицированным распределением Райса.

Была выявлена зависимость вида распределения от коэффициента асимметрии

$$\bar{\gamma}_1 = \bar{\mu}_3 \bar{D}_{s_M}^{-3/2},$$

где $\bar{\mu}_3$ – третий центральный выборочный момент, а именно, при $\bar{\gamma}_1 < 0$ наилучшей аппроксимацией является бета-распределение, а при $\bar{\gamma}_1 > 0$ – модифицированное распределение Райса. При $\bar{\gamma}_1 = 0$ точность аппроксимации обоими видами распределений примерно одинакова.

Переходя к закону распределения коэффициента прозрачности, ограничимся случаем, наиболее неблагоприятным для АЛС, когда реальное распределение МДВ отображается законом распределения Рэля (3). Выполняя преобразования распределения Рэля в соответствии с (1), получим для $\lambda = 0,55$ мкм плотность распределения величины T в виде

$$\varpi(T) = \frac{\gamma}{T \ln T} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right), \quad (5)$$

где $\gamma = \frac{(3,97L)^2}{\sigma^2 \ln^2 T}$, σ – параметр исходного рэлеевского распределения.

Поскольку значение T имеет физический смысл в интервале то следует использовать в расчетах усеченное распределение (5) в виде

$$F(T) = \frac{d_1 \gamma}{T \ln T} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right), \quad (6)$$

где $d_1 = \left[\int_0^1 \frac{\gamma}{T \ln T} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) dT \right]^{-1}$.

Вид распределения T во всем видимом диапазоне будет незначительно отличаться от (6), так как множитель $\left(\frac{0,55}{\lambda_i}\right)^q$ близок к единице в этом диапазоне волн.

Результаты расчета по формуле (6) представлены на рис. 1. На этом же рисунке, а также на рис. 2, 3 построены по данным [4] с использованием закона Бугера среднегодовые эмпирические полигоны накопленных частностей коэффициента прозрачности.

Из рис. 2, 3 видно, что по мере увеличения длины выбранных гипотетических трасс вид полигонов упрощается и наблюдается их линеаризация. Это привело к предположению о наличии более простой аппроксимации, нежели соотношение (6), для чего был выполнен анализ восьми распределений (усеченное Вейбулла 1, модифицированное арксинус 2, усеченное экспоненциальное 3, усеченное Рэля 4, усеченное Максвелла 5, усеченное нормальное 6, бета-распределение 7, усеченное логарифмически нормальное 8), представленных на рис. 1.

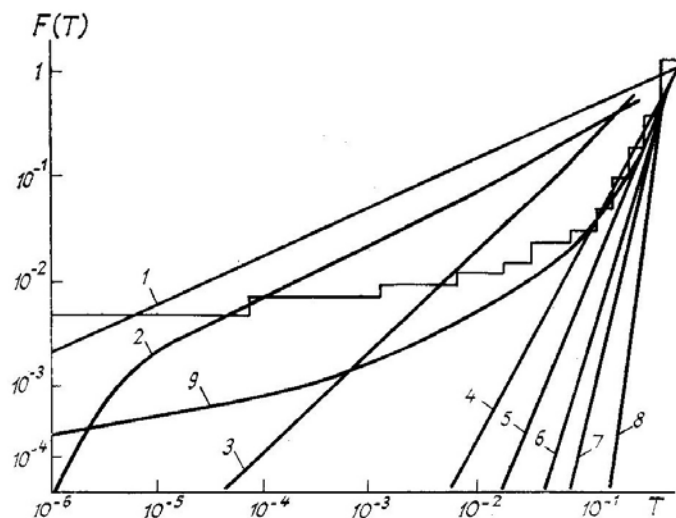


Рис. 1. Эмпирическая (ступенчатая кривая) и теоретические функции распределения T ($\lambda = 0,55$ мкм, $L = 1$ км). 1–8 – номера кривых соответствуют номерам распределений в тексте, 9 – кривая распределения (6)

Анализ показал, что распределение (6) все же наиболее точно по критерию согласия Колмогорова аппроксимирует полигон T (рис. 1). Хорошие результаты также при $L \geq 5$ км дает модифицированное усеченное распределение Вейбулла (рис. 2, 3) вида

$$F(T) = \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{T}{m_T}\right)^{r(\lambda, L)}\right]}{1 - \exp\left[-m_T^{-r(\lambda, L)}\right]}, \quad (7)$$

где $r(\lambda, L) = L^{1,38 \exp(-\sqrt{\lambda})}$ – параметр распределения.

Полученные выводы справедливы для видимого и ближнего ИК-диапазонов, однако применение соотношения (2) для среднего ИК-диапазона приводит к значительным ошибкам, особенно это относится к перспективной для АЛС $\lambda = 10,6$ мкм ввиду заметного влияния на ослабление непрерывного поглощения в водяном паре. Поэтому для установления статистических характеристик коэффициента прозрачности на этой длине волны были использованы данные измерений ослабления излучения CO_2 -лазера, выполненные в пос. Воейково Ленинградской области [13] в течение 3 лет в различные сезоны года. Общее число измерений составило 19062, подавляющая часть которых (18387) была получена в условиях дымки различной плотности. Процедура обработки результатов измерений с выделением аэрозольной компоненты ослабления подробно изложена в [14]. Для тех же длин гипотетических трасс, что и ранее были вычислены на ЭВМ статистические характеристики коэффициента прозрачности и построены функции распределения (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что наиболее хорошо отображает распределение по экспериментальным данным, начиная с $L \geq 5$ км, так же как в видимом и ближнем ИК-диапазонах усеченное распределение Вейбулла (7), но с регулировочным параметром $r \approx 2 \frac{\lambda}{L}$, что физически объясняется различным соотношением в этих диапазонах длины волны излучения и размеров аэрозолей.

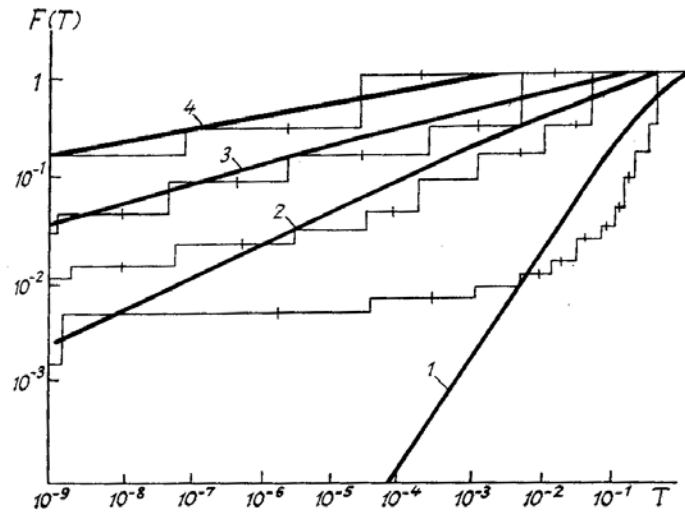


Рис. 2. Вероятностные распределения T для $\lambda = 0,53$ мкм и $L = 1, 5, 10$ и 20 км (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно). 1 — экспоненциальное распределение, 2, 3 и 4 — распределение (7) со значениями параметра $r(\lambda, L) = 1/2, 1/3, 1/5$ и $1/7$ соответственно

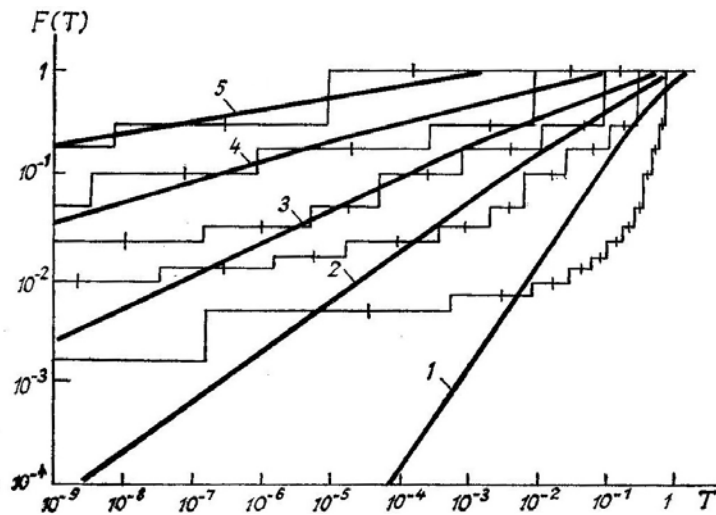


Рис. 3. Вероятностные распределения T для $\lambda = 1,06$ мкм и $L = 1, 5, 10, 20$ и 50 км (кривые 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно). 1 — экспоненциальное распределение, 2, 3, 4 и 5 — распределение (7) со значениями параметра $r(\lambda, L) = 1/2, 1/3, 1/5$ и $1/7$ соответственно

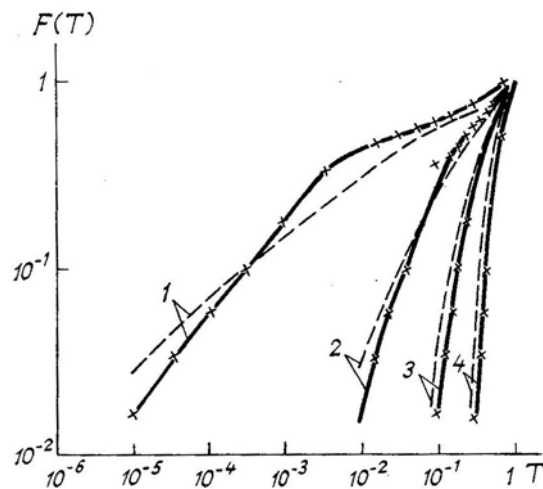


Рис. 4. Эмпирические и теоретические функции распределения коэффициента прозрачности атмосферы для $\lambda = 10,6$ мкм: сплошные линии — эксперимент, штриховые — теория. 1 — $L = 50$ км; 2 — $L = 20$ км; 3 — $L = 10$ км; 4 — $L = 5$ км

С целью установления закона распределения коэффициента прозрачности всей толщи атмосферы на наклонных трассах были использованы данные актинометрических наблюдений, для которых удобно записать интегральный коэффициент прозрачности в виде

$$T = \frac{I_s}{I_0} = \frac{\int_0^{\infty} I_0(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_0(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

где I_s и I_0 — соответственно интенсивности солнечного излучения у поверхности Земли и вне пределов атмосферы ($I_0 = 1370 \frac{B_m}{M^2}$ — солнечная постоянная).

Для учета зависимости измеренного значения I_s от высоты (угла места Ω) Солнца вводится относительный коэффициент прозрачности

$$T_s = \frac{I_{s_0}}{I_0}, \quad (9)$$

где I_{s_0} — интегральная интенсивность солнечного излучения у поверхности Земли для идеальной атмосферы, ослабление солнечной радиации которой сводится только к рассеянию и для которой, следовательно, $S_m = S_{\max}$.

Величина I_{s_0} связана с солнечной постоянной I_0 на уровне моря с учетом эффекта Форбса [15]

$$I_{s_0} = I_0 (1,04 - 0,160 \sqrt{l}), \quad (10)$$

где l — относительная длина наклонной трассы (число оптических масс)

$$l = \frac{1}{H} (\sqrt{H^2 + 2RH + R^2 \sin^2 \Omega} - R \sin \Omega), \quad (11)$$

$R = 6384$ км — радиус Земли; $H = 8,0$ км — толщина однородной атмосферы.

Используя (8) и (9), получим

$$T = T_s T_0, \quad (12)$$

где $T_0 = \frac{I_{s_0}}{I_0}$.

В выражении (12) T_0 — детерминированная величина, зависящая только от Ω , а T_s — случайная величина, определяющая изменение коэффициента прозрачности T .

На ЭВМ были обработаны данные ежедневных стандартных наблюдений I_s , приводимые в актинометрических ежемесячниках и фиксируемые там же соответствующие значения Ω , для Ленинградской области за 3 года (1980—1982 гг.). По I_s и Ω вычислялся T_s , диапазон значений которого был разбит на 19 интервалов от 0 до 1. Дальнейшая обработка вычислений выполнялась по методике, изложенной в [8].

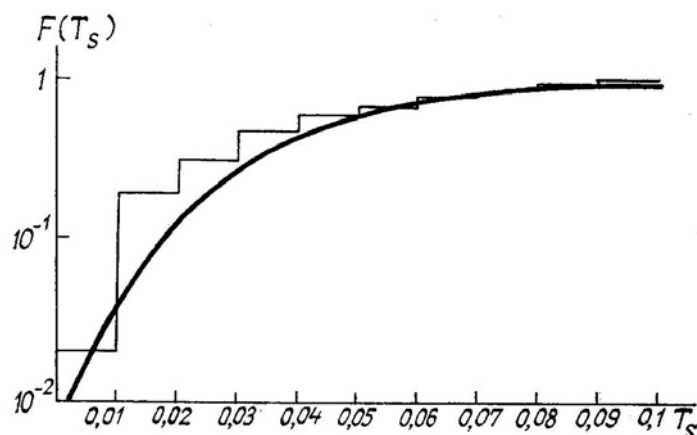


Рис. 5. Эмпирическая (ступенчатая кривая) и теоретическая функции распределения коэффициента прозрачности атмосферы на наклонных трассах для первой ситуации

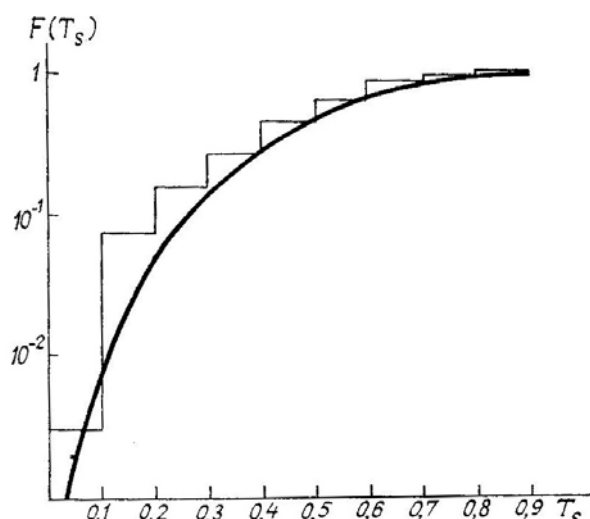


Рис. 6. Эмпирическая (ступенчатая кривая) и теоретическая функции распределения коэффициента прозрачности атмосферы на наклонных трассах для второй ситуации

Анализ генеральной совокупности данных показал [16], что при проведении актинометрических наблюдений можно было выделить две характерные ситуации. К первой относятся случаи, когда Солнце просвечивает сквозь облака и коэффициент прозрачности определяется, главным образом, поглощением, и рассеянием в облаках, при этом значения T_s изменяются от 0 до 0,1. Вторая ситуация связана с аэрозольным поглощением и рассеянием в условиях дымки, когда солнечный диск не закрыт облаками, и характеризуется значениями T_s в диапазоне 0,1–1,0. Для первой ситуации наилучшей по критерию хи-квадрат аппроксимацией эмпирических распределений коэффициента прозрачности является усеченное распределение Рэлея (рис. 5), а для второй — модифицированное бета-распределение (рис. 6).

Заключение

1. Установлено, что усеченное распределение Вейбулла хорошо аппроксимирует эмпирическое распределение коэффициента прозрачности атмосферы на горизонтальных трассах как в видимом, так и в ИК-диапазонах.

2. На наклонных трассах коэффициент прозрачности аппроксимируется усеченным распределением Рэлея и модифицированным бета-распределением.

1. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 191 с.
2. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Радиотехника. 1985. № 2. С. 11–18.
3. Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат, 463 с.
4. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 8. С. 883–886.
5. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Метеорология и гидрология. 1981. № 3. С. 32–38.
6. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Метеорология и гидрология. 1982. № 9. С. 108–110.
7. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 9. С. 998–1000.
8. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 2. С. 198–204.
9. Morita K., Joshida F. //Rev. Electr. Commun. Lab. 1971. V. 19. № 5. P. 348–355.
10. Сушкова Л.Т. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. № 5. С. 554–556.
11. Милютин Е.Р. //Тр. учебн. инстит. связи. 1976. Вып. 73. С. 197–199.
12. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982 624 с.
13. Сербин А.И., Броунштейн А.М., Казакова К.В. //Труды ГГО. 1976. Вып. 357. С. 187–193.
14. Милютин Е.Р., Сербин А.И., Яременко Ю.И. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 8. С. 796–802.
15. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеониздат, 1968. 232 с.
16. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. //Метеорология и гидрология. 1991. (В печати).

Ленинградский электротехнический институт связи

Поступила в редакцию
31 июля 1991 г.

E. R. Milyutin, Yu. I. Yaremenko. The Distribution Laws of the Atmospheric Transmission in the Visible and IR Bands.

Based on the analysis of experimental data, distribution laws of atmospheric transmission in visible and IR bands have been derived.