

В.П. Иванов

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В работе рассматривается алгоритм построения модели функции плотности распределения прозрачности приземного слоя атмосферы для излучения на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм. Разработана модель прозрачности атмосферы в зависимости от метеорологической дальности видимости. Для описания распределения метеорологической дальности видимости предложено распределение Джонсона.

При решении широкого круга прикладных задач, связанных с лазерным дистанционным зондированием в приземном слое атмосферы [1], необходимо учитывать ее влияние на прохождение излучения. Количественной характеристикой потерь излучения служит спектральная прозрачность атмосферы. Современные требования диктуют необходимость климатических данных по указанному геофизическому параметру, в частности, его распределения вероятности. Натурные же измерения спектральной прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне, выполненные в ряде научных центров СССР, носили эпизодический характер и не могут служить основой для получения соответствующих климатических характеристик.

Одним из путей решения указанной проблемы может служить разработка вероятностной модели, алгоритм которой базируется на двух основных положениях:

– прозрачность атмосферы в ИК-диапазоне оценивается по эмпирической модели, разработанной на основе результатов эпизодических экспериментов, где в роли входных параметров выступают данные стандартных метеорологических наблюдений;

– в модель заложены климатические данные используемых метеорологических параметров.

В настоящей статье рассматривается алгоритм построения аналитической модели функции плотности распределения вероятности прозрачности приземного слоя атмосферы (ПА) в ближней ИК-области спектра — для излучения на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм. Излучение в области $\lambda = 1,064$ мкм генерируется лазерами на алюмоиттриевом гранате (АИГ), которые широко используются в лазерных локационных системах инфракрасного диапазона [1].

Согласно исследованиям [2] ослабление излучения АИГ-лазера с длиной волны $\lambda = 1,06415$ мкм за счет молекулярного поглощения в области его полосы люминесценции варьирует в пределах 0–20% на 10-км горизонтальной трассе, достигая максимума на частоте $9391,96 \text{ см}^{-1}$. Основным поглощающим компонентом атмосферы является водяной пар. Вкладом CO_2 и O_2 можно пренебречь. В то же время для этой области пренебрежимо мало молекулярное рассеяние — $8,458 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$. Следовательно, в микроокнах прозрачности, например $\lambda = 1,0641$ мкм, атмосферный аэрозоль является основным фактором ослабления, причем его роль возрастает с замутнением атмосферы.

На основе экспериментального материала, полученного автором в районе Среднего Поволжья [3], была установлена эмпирическая зависимость между вариациями показателя аэрозольного ослабления в ближнем ИК-(1,06 мкм) и видимом (0,55 мкм) диапазонах спектра. Графически рассматриваемая взаимосвязь для погодных условий, характеризуемых отсутствием гидрометеоров или литометеоров, показана на рис. 1.

Главный фактор, определяющий динамику оптической погоды в указанных условиях, — конденсационный процесс. Поэтому условно обозначим их как погодные условия «конденсационного» типа. На основе приведенных на рис. 1 экспериментальных данных была разработана аналитическая модель, связывающая прозрачность атмосферы в ближней ИК-области с метеорологической дальностью видимости (МДВ):

$$T_{1,06} = \exp[-\beta_{1,06} \cdot L] = \exp\left[-\left(\frac{3,689}{S_M} - 0,075\right)^{1,035} \cdot L\right], \quad (1)$$

где S_M , км — МДВ; L — протяженность трассы, км.

В свою очередь МДВ связана с показателем аэрозольного ослабления $\beta_{0,55}$ согласно известному соотношению:

$$S_M \simeq 3,912/\beta_{0,55}.$$

Результаты расчетов с использованием аналитической модели (1) отмечены на рис. 1 крестиками. Они указывают, что предлагаемая модель хорошо согласуется с данными натурных экспериментов.

Эмпирические интегральные распределения МДВ — $F(S_M)$, для района Среднего Поволжья (представительная станция Горький): для погодных условий «конденсационного» типа зимнего и летнего сезонов года, представлены на рис. 2. Статистика по МДВ получена за десятилетний период наблюдений.

Оптическое состояние атмосферы зависит от большого количества случайных процессов, происходящих в ней. Естественно предположить, что результирующий эффект будет выражен в виде нормально распределенной величины МДВ или же в виде распределения, являющегося его модификацией.

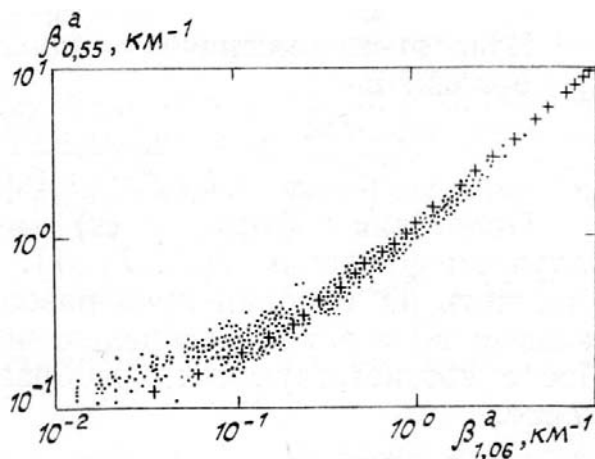


Рис. 1. Эмпирическая взаимосвязь между вариациями показателя аэрозольного ослабления в ближнем ИК ($\lambda = 1,06$ мкм) и видимом ($\lambda = 0,55$ мкм) диапазонах спектра

Распределения МДВ, приведенные на рис. 2, обладают асимметрией, являются одномодальными, слева ограничены нулем и в общем случае не ограничены справа. Действуя в соответствии с методикой, изложенной в [4], получаем, что к нашей задаче подходит распределение Джонсона. Более ранняя попытка аналитического описания распределения МДВ с помощью распределения Джонсона сделана в [5]. Характеристика четырехпараметрического распределения Джонсона (параметры ϵ , λ , γ , η в общепринятых обозначениях) приведена в [4].

В общей форме распределение Джонсона для МДВ с учетом, что в нашем случае полагаем $\epsilon = 0$, а $\lambda = 100$ км, имеет следующий вид:

$$f(S_M) = \frac{39,89\eta}{100S_M - S_M^2} \cdot \exp \left\{ -0,5 \left[\gamma + \eta \ln \left(\frac{S_M}{100 - S_M} \right) \right]^2 \right\}. \quad (2)$$

Оценки параметров η и γ [4] для рассматриваемых эмпирических распределений МДВ следующие:

$$\text{зима} - \eta = 0,79, \gamma = 2,04;$$

$$\text{лето} - \eta = 0,77, \gamma = 1,38.$$

Полученные после аппроксимации интегральные характеристики МДВ показаны на рис. 2.

В итоге имеем аналитическую модель ПА в ближней ИК-области ($\lambda = 1,06$ мкм), в которой аргументом выступает МДВ. Если известен при этом закон распределения случайной величины — МДВ, то, используя метод преобразования случайной переменной, можем получить распределение ПА — $f(T_{1,06})$.

Метеорологическую дальность видимости можно считать непрерывной случайной величиной, меняющейся в пределах от 0 до 100 км, с плотностью распределения $f(S_M)$. В свою очередь, ПА ($\lambda = 1,06$ мкм) — это строго возрастающая в пределах от 0 до 1,0 функция случайной величины S_M . Тогда закон распределения случайной величины $T_{1,06}$ может быть записан в следующей форме:

$$f(T_{1,06}) = f[S_M(T_{1,06})] \cdot \left| \frac{dS_M}{dT_{1,06}} \right|. \quad (3)$$

Из соотношения (1) можно получить выражение для S_M как функции от $T_{1,06}$:

$$S_M = \frac{3\,689}{0,075 + y^{0,966}}, \quad (4)$$

где $y = -\frac{\ln T_{1,06}}{L}$; $T_{1,06}$ — ПА на трассе L , км.

Взяв от выражения (4) производную по $T_{1,06}$, получим якобиан преобразования:

$$\frac{dS_M}{dT_{1,06}} = \frac{3,564}{L (y^{0,966} + 0,075)^2 y^{0,034} \exp(-yL)} \quad (5)$$

Подставив в формулу (2) вместо аргумента S_M выражение (4), получаем функцию $f[S_M(T_{1,06})]$, которую согласно (3) необходимо умножить на якобиан преобразования (5), чтобы получить в окончательном виде закон распределения ПА в области спектра $\lambda = 1,06$ мкм. После соответствующих преобразований получаем следующее выражение:

$$f(T_{1,06}) = \frac{10,447\eta}{L (27,11y^{0,966} + 1,033)y^{0,034} \exp(-yL)} \exp\{-0,5[\gamma - \eta \ln(27,11y^{0,966} + 1,033)]^2\} \quad (6)$$

Формула (6) является аналитическим выражением закона распределения вероятности ПА ($\lambda = 1,06$ мкм) в погодных условиях «конденсационного» типа.

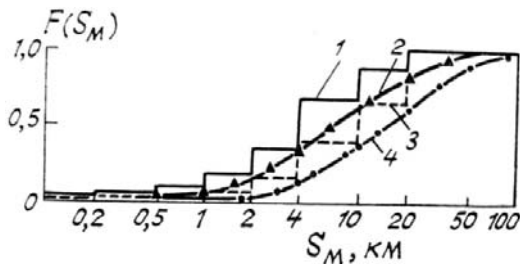


Рис. 2. Интегральные распределения МДВ в погодных условиях «конденсационного» типа: 1—эмпирическое (зима); 2—аппроксимация (зима); 3—эмпирическое (лето); 4—аппроксимация (лето)

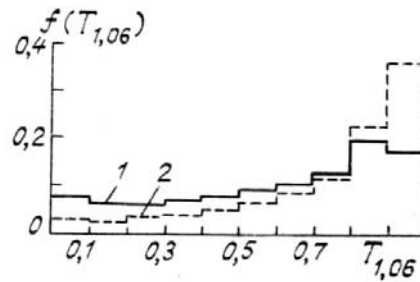


Рис. 3. Гистограммы повторяемости ПА ($\lambda = 1,06$ мкм) в погодных условиях «конденсационного» типа: 1—зима; 2—лето

После подстановки в выражение (6) значений параметров η и γ , указанных выше, были рассчитаны гистограммы повторяемости ПА ($\lambda = 1,06$ мкм) для района Среднего Поволжья в зимнее и летнее время года. Результаты расчетов для случая $L = 1$ км графически представлены на рис. 3. Распределение ПА в зимнее время имеет пологий ход с максимумом ($\sim 20\%$), приходящимся на интервал $T_{1,06} \in 0,8 \div 0,9$. Летом распределение ПА имеет сильную левостороннюю асимметрию, узкий, приходящийся на градацию $0,9 - 1,0$, максимум, уровень которого составляет 36% .

Предлагаемый алгоритм моделирования ПА построен с учетом только одного фактора ослабления — аэрозольного. Принципы построения модели распределения ПА в ИК-диапазоне с учетом как аэрозольного, так и газового компонентов ослабления излучения рассмотрены в [6, 7].

В заключение следует отметить, что знание закона распределения ПА позволяет выполнить вероятностные оценки влияния атмосферы при анализе систем, использующих оптическое излучение для передачи информации.

1. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Воениздат, 1987. 175 с.
2. Мицель А. А., Руденко В. П., Сеница Л. Н., Солодов А. М. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 5. С. 43—47.
3. Филиппов В. Л., Иванов В. П., Колобов Н. В. Динамика оптической погоды. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1986. 157 с.
4. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 395 с.
5. Сушкова Л. Т. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. XII. № 5. С. 554—556.
6. Зайнуллин Д. С., Иванов В. П., Филиппов В. Л. // Метеорология и гидрология. 1986. № 5. С. 51—56.
7. Иванов В. П., Зайнуллин Д. С., Филиппов В. Л. // Циркуляция атмосферы и колебания климата. Казань. Изд-во Казанского ун-та, 1989. С. 101—108.

Государственный институт прикладной оптики,
Казань

Поступила в редакцию
2 апреля 1990 г.

V. P. Ivanov. Simulation of the Atmospheric Transmission Distribution in the Near Infrared Region.

An algorithm of constructing the model of transmission distribution density function for the atmospheric ground layer at $1.064 \mu\text{m}$ wavelength is considered. A model of atmospheric transmission as a function of meteorological visual range is developed. For describing the meteorological visual range distribution the Johnson distribution is suggested.