

В.П. Иванов

**К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ
ОЦЕНКИ ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

Рассматривается инженерная методика оценки пропускания атмосферы в спектральных диапазонах 3 ... 5 и 8 ... 12 мкм. Входными параметрами в методику являются данные стандартных метеорологических наблюдений. Приведены погрешности диагностики пропускания атмосферы при использовании штатных метеорологических приборов.

Многие современные оптико-электронные приборы (ОЭП) работают по атмосферному каналу передачи информации. Поэтому уже на стадии проектирования прибора необходимо учитывать влияние среды, в частности, ее пропускание, на выполнение, например, таких важнейших требований к ОЭП, как достижение заданной дальности действия. Предлагаемая в данной статье инженерная методика диагностики пропускания атмосферы в спектральных диапазонах 3 ... 5 и 8 ... 12 мкм позволяет разработчику выполнять подобные оценки для широкого класса ОЭП, работающих в среднем и дальнем ИК-диапазонах [1, 2].

Сфера и условия применения указанной методики: 1) приземный слой атмосферы (горизонтальные трассы визирования); 2) Атлантико-континентальная европейская климатическая область СССР (по классификации Б.П. Алисова [3]); 3) погодные условия, характеризующиеся температурой воздуха $T > -12^\circ\text{C}$ при отсутствии гидро- или литометеоров [4].

В качестве характеристики пропускания в спектральном интервале $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ выбран интегральный показатель — широкополосная функция пропускания атмосферы (ФПА). В области $\Delta\lambda$ она определяется соотношением

$$\tau_{\Delta\lambda} \simeq \tau_{\Delta\lambda}^m \tau_{\Delta\lambda}^a, \quad (1)$$

$\tau_{\Delta\lambda}^m$ — ФПА, обусловленная потерями на поглощение атмосферными газами, включая поглощение в континууме водяного пара; $\tau_{\Delta\lambda}^a$ — ФПА, обусловленная потерями на аэрозольное ослабление.

Величина $\tau_{\Delta\lambda}^m$ определяется интегрированием по спектру длин волн функций пропускания основных атмосферных газов. Применительно к задаче расчета отношения сигнал-шум на выходе ОЭП (см., например, [1]) указанное произведение функций пропускания в целях учета спектральной селективности излучения от объекта наблюдения и спектральной характеристики фотоприемного устройства дополнительно нормируется следующим образом:

$$\tau_{\Delta\lambda}^m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial B(\lambda, T)}{\partial T} S(\lambda) \prod_{i=1}^N \tau_{\lambda}^{m_i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial B(\lambda, T)}{\partial T} S(\lambda) \lambda d\lambda}, \quad (2)$$

где $\tau_{\lambda}^{m_i}$ — спектральное пропускание i -го газа: для области $\lambda \in 3 \dots 5$ мкм $i = 7$ (H_2O , CO_2 , CH_4 , CO , O_3 , N_2O и континуум водяного пара), а для $\lambda \in 8 \dots 12$ мкм $i = 6$ (H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , N_2O и континуум водяного пара); $S(\lambda)$ — приборная функция, принимаемая равной единице в области $\lambda \in \lambda_1 - \lambda_2$ и равна нулю за пределами этого диапазона; $B(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической светимости черного тела ($\text{Вт} \cdot \text{см} \cdot \text{мкм}^{-1}$), при радиационной температуре объекта T_0 , которая в расчетах принята в равной 283 К.

Наличие длины волны, излучения λ в подынтегральных выражениях соотношения (2) вытекает из определения обнаружительной способности фотоприемника с теоретическими характеристиками [1].

Для случая фиксированной оптической трассы ($R = \text{const}$) спектральное пропускание водяного пара $\tau_{\lambda}^{\text{H}_2\text{O}}$ и континуума водяного пара τ_{λ}^k можно рассматривать как функцию абсолютной влажности

воздуха; соответственно $\tau_{\lambda}^{\text{CO}_2}$, $\tau_{\lambda}^{\text{O}_3}$, $\tau_{\lambda}^{\text{CH}_4}$, $\tau_{\lambda}^{\text{CO}}$, $\tau_{\lambda}^{\text{N}_2\text{O}}$ — как функции объемных концентраций указанных газов, которые с учетом условий применения методики принимаются постоянными.

Следовательно, коэффициент пропускания (молекулярный компонент) $\tau_{\Delta\lambda}^M$ при условии $R = \text{const}$ можно представить в виде однопараметрической функции, где в качестве аргумента выступает абсолютная влажность воздуха a (г/м).

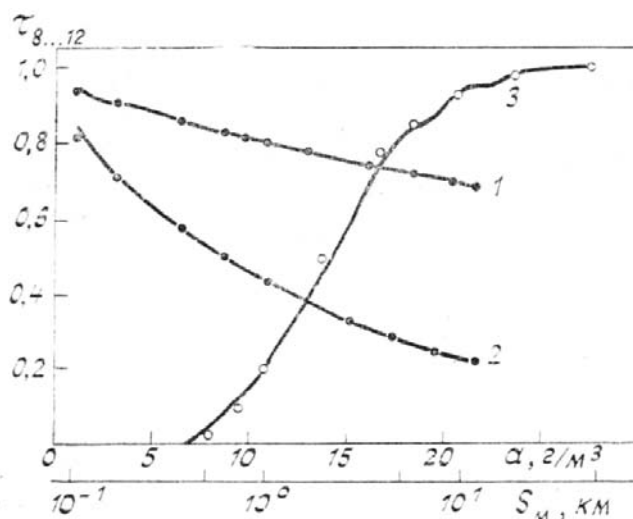
Автором были выполнены расчеты ФПА (3 ... 5 и 8 ... 12 мкм) для широкого диапазона изменений абсолютной влажности воздуха $a \in 0 \dots 25$ г/м³ и достаточно подробного набора трасс от 0,5 до 10 км. При этом расчеты спектрального пропускания атмосферных газов (H₂O, CO₂, O₃, CH₄, CO, N₂O) выполнены по методике, изложенной в [5]. Пропускание в континууме водяного пара в области $\lambda \in 3 \dots 5$ мкм также оценено по данным [5]. Оценка пропускания в континууме водяного пара в области $\lambda \in 8 \dots 12$ мкм выполнена согласно эмпирической модели [6].

На основе обобщений этого материала построены аналитические зависимости ФПА от абсолютной влажности и протяженности оптической трассы:

$$\tau_{3\dots 5}^M = \exp - [0,145R^{0,529} \cdot \ln(a/217) + 1,19 \cdot R^{0,465}], \quad (3)$$

$$\tau_{8\dots 12}^M = \exp \left[\frac{0,011 \ln R - 0,0156a - 0,049}{R^{-0,881}} \right]. \quad (4)$$

В качестве примера результаты выборочных оценок ФПА ($\lambda \in 8 \dots 12$ мкм) на рисунке показаны темными кружками относительно соответствующих зависимостей, построенных на основе исходного материала (кривые 1, 2). Как видно из рисунка, аналитическая зависимость находится в хорошем соответствии с исходными данными.



Модели широкополосной функции пропускания атмосферы ($\lambda \in 8 \dots 12$ мкм): кривая 1 — молекулярный компонент $R = 1$ км, 2 — молекулярный компонент $R = 5$ км, 3 — аэрозольный компонент $R = 1$ км, • — расчет согласно (5), ○ — расчет согласно (8)

Аэрозольная составляющая ослабления — наиболее изменчивый компонент ФПА, режим которого зависит от многих геофизических факторов, причем ему присущи как суточная, так и сезонная изменчивость спектральных характеристик, зависимость их от географического фактора [4, 7].

Потери на аэрозольное ослабление могут быть учтены с использованием эмпирической зависимости вида

$$\tau_{\Delta\lambda}^a = \exp \left(- \frac{3,91}{S_m} \mu_{\Delta\lambda} R \right), \quad (5)$$

где S_m — метеорологическая дальность видимости (МДВ); $\mu_{\Delta\lambda}$ — средний нормированный показатель аэрозольного ослабления в диапазоне $\Delta\lambda$, значения которого, детерминированные по градациям МВД, для рассматриваемых погодных условий определяются на основе региональной эмпирической модели [7]. В графической форме указанная эмпирическая зависимость $\tau_{8\dots 12}^a$ ($S_m, R = 1$ км) показана на рисунке — кривая 3.

В соотношении (5) значение показателя $\mu_{\Delta\lambda}$ задается дискретно и является постоянным в преде-

лах определенной градации МДВ, поэтому зависимость $\tau_{\Delta\lambda}^a(S_M)$ может испытывать резкие изменения на границах градаций МДВ, что является определенным недостатком моделей подобного класса. На основе исходного экспериментального материала был разработан второй двухпараметрический вариант модели $\tau_{\Delta\lambda}^a(S_M, R)$, в котором указанный недостаток исключен,

$$\tau_{3...5}^a(S_M, R) = \exp \left[\frac{0,488 \ln S_M - 2,26}{S_M} R \right], \quad (6)$$

$$\tau_{8...12}^a(S_M, R) = \exp \left[\frac{0,346 \ln S_M - 1,665}{S_M} R \right]. \quad (7)$$

На рисунке относительно эмпирической зависимости $\tau_{8...12}^a(S_M, R = 1 \text{ км})$ — кривая 3 — светлыми кружками отмечены результаты соответствующих расчетов согласно соотношению (7). Между указанными моделями ФПА имеется хорошее соответствие.

Следует отметить, что предлагаемый вариант методики диагностики прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне удобен для инженерных оценок и рекомендуется к использованию в рамках натурального эксперимента, так как входными параметрами в методику служат данные стандартных метеорологических наблюдений. Оценки относительной погрешности определения ФПА $\Delta\lambda \in 3 \dots 5$ и $8 \dots 12$ мкм) для разных значений МДВ и трассы протяженностью $R = 1$ км при использовании рассмотренной методики приведены в таблице. Они рассчитаны из условия регистрации МДВ стандартной аппаратурой — с помощью нефелометрической установки М-71 [8] или базового фотометра РДВ-3 [8], а температуры воздуха и характеристики влажности — с использованием аспирационного психрометра МВ-4М [9].

Относительная погрешность определения ФПА — $\Delta\tau_{\Delta\lambda}$, %

Прибор	S_M , км				
	1	3	5	10	25
М-71	112	35	23	16	12
РДВ-3	85	32	23	16	12

В заключение необходимо отметить, что основной вклад в погрешность оценки прозрачности атмосферы вносят погрешности регистрации МДВ штатной метеорологической аппаратурой.

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
3. Мячкова Н. А. Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1983. 192 с.
4. Динамика оптической погоды / В.Л. Филиппов, В.П. Иванов, Н.В. Колобов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. 157 с.
5. Филиппов В. Л., Козлов С. Д., Румянцева Н. А., Зиатдинова Н. М., Макаров А. С. Прозрачность атмосферы в диапазоне 1–14 мкм при высокой метеорологической дальности видности. Томск, 1984. 51 с. Деп. в ВИНТИ 27.02.84, № 2483-84.
6. Макаров А. С., Филиппов В. Л. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1978. Т. XXI. № 3. С. 368–371.
7. Филиппов В. Л., Макаров А. С., Иванов В. П. // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265. № 6. С. 1353–1356.
8. Стернзат М. С. Метеорологические приборы и измерения. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 392 с.
9. Влажность воздуха и ее измерение / В.А. Зайцев, А.А. Ледохович, Г.Т. Никандрова. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 112 с.

Государственный институт прикладной оптики,
Казань

Поступила в редакцию
11 июня 1990 г.

V. P. Ivanov. Development of an Engineering Procedure of Estimating the Atmospheric Transmission.

An engineering procedure of estimating the atmospheric transmission in the 3 to 5 μm and 8 to 12 μm spectral ranges is considered the data of conventional meteorological observations are used as input parameters for the procedure. Errors of the atmospheric transmission diagnostics using standard meteorological devices are estimated.