

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужegov

ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИАЦИИ В ДИАПАЗОНЕ 8—12 МКМ

В работе приводятся статистические характеристики коэффициентов ослабления оптической радиации ϵ_λ и метеорологических параметров атмосферы прибрежной зоны. Рассмотрены различные варианты восстановления ϵ_λ с применением пятипараметрического регрессионного уравнения. Показано, что этот метод можно использовать для разделения ϵ_λ на аэрозольную и молекулярную компоненты, а также для выявления температурной зависимости коэффициента континуального поглощения паров воды и вклада поглощения мелкодисперсного аэрозоля в общее аэрозольное ослабление в области 8—12 мкм.

При рассмотрении физических аспектов ослабления оптического излучения в атмосфере наиболее острые дискуссии вызывает диапазон длинноволнового окна прозрачности 8—12 мкм. В частности, данные теоретических и лабораторных исследований показывают существование положительной квадратичной зависимости коэффициента поглощения в континууме водяного пара (β_λ) от парциального давления паров воды (e) и отрицательной зависимости от температуры (t) [1—4]. В то же время в натурных исследованиях отмечается линейная зависимость коэффициента β_λ от e в диапазоне 8—11 мкм, а температурная зависимость вообще не выявляется [5].

Такая неоднозначность выводов о поглощении радиации в континууме водяного пара является следствием того, что в реальной атмосфере, в отличие от кюветы, парциальное давление паров воды и температура воздуха взаимосвязаны, что приводит к искажению зависимости β_λ от e , а вариации аэрозольной компоненты ослабления почти полностью маскируют температурную зависимость. Чтобы провести количественную оценку вклада различных физических процессов в затухании ИК радиации в атмосфере необходимо исследовать связи между параметрами, наиболее адекватно отражающими эти процессы. Одним из методов исследования таких связей является линейный множественный регрессионный анализ, применимость которого рассматривается в данной работе.

В качестве исходного экспериментального материала для такого анализа был взят массив коэффициентов общего ослабления радиации ϵ_λ и соответствующие ему массивы метеопараметров (e и t), полученные при измерениях прозрачности атмосферы на горизонтальной надводной трассе длиной 3,7 км на Черноморском побережье Крыма в августе—сентябре 1981 г.

В качестве входных параметров в уравнении регрессии были использованы: e (мбар) и t (°C), отражающие вариации ϵ_λ за счет изменений влажности и температуры воздуха, а также коэффициент аэрозольного ослабления в области $\lambda = 3,9$ мкм — $\alpha_{3,9}$ (км⁻¹) и параметр $\Delta\alpha = \alpha_{0,55} - \alpha_{3,9}$ (км⁻¹), отражающие изменчивость ϵ_λ за счет вариаций грубо- и мелкодисперсной фракций соответственно. Значения $\alpha_{3,9}$ находились предварительно с использованием двухпараметрической модели, где в качестве входных параметров служили $\alpha_{0,55}$ и e [6]. В этом случае уравнение регрессии можно представить в виде:

$$\epsilon_\lambda = \beta_\lambda + \alpha_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e + K_{2\lambda} \cdot t) + (K_{0\lambda}^a + K_{3\lambda} \cdot \alpha_{0,55} + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9} + K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha) \pm \delta_{\epsilon_\lambda}, \quad (1)$$

где $K_1 \dots K_5$ — коэффициенты регрессии, учитывающие весовой вклад соответствующих входных параметров в ϵ_λ ; K_0^M и K_0^a — молекулярная и аэрозольная составляющие свободного члена ($K_0 = K_0^M + K_0^a$), учитывающие вклад в ϵ_λ факторов, некоррелирующих с входными параметрами. Как показал специально проведенный анализ, численное значение аэрозольной составляющей $K_{0\lambda}^a$ равно величине погрешности восстановления коэффициента общего ослабления $-\delta_{\epsilon_\lambda}$, обусловленной в основном вариациями аэрозольного ослабления во всем диапазоне длин волн. В этом случае $K_0^M = K_{0\lambda} - \delta_{\epsilon_\lambda}$. Для удобства последующего рассмотрения в выражении (1) молекулярная β_λ и аэрозольная α_λ компоненты ϵ_λ выделены круглыми скобками.

Для вычисления коэффициентов $K_0 \dots K_5$ необходимо иметь средние значения всех параметров \bar{x} , входящих в уравнение (1), их стандартные отклонения σ_x и коэффициенты взаимной корреляции $r_{x_j x_k}$ [7]. Расчет этих характеристик был проведен для упомянутого выше массива данных, насчитывающего 168 реализаций. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Для обоснования применимости регрессионного анализа в подобного рода задачах важным является условие адекватности разделения общего ослабления на молекулярную и аэрозольную компоненты независимо от числа входных параметров в уравнении (1). В связи с этим расчет коэффициентов регрессии

$K_{i\lambda}$ был проведен для пяти различных комбинаций входных параметров. Результаты расчета представлены в табл. 2, где для каждого варианта расчета приведены соответствующие уравнения регрессии, представляющие собой частные случаи общего выражения (1). Отметим, что коэффициенты K_3 , K_4 и K_5 — безразмерны, K_0^M , K_0^a , и δ_ε — имеют размерность км^{-1} , K_1 — $\text{км}^{-1} \cdot \text{мбар}^{-1}$, K_2 — $\text{км}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$.

Таблица 1

Статистические характеристики исходных величин регрессионного уравнения (1)

x	\bar{x}	σ_x	$\rho_{\alpha_{0,55}x}$	$\rho_{\alpha_{3,9}x}$	$\rho_{\Delta z x}$	ρ_{ex}	ρ_{tx}
$\alpha_{0,55}$, км^{-1}	0,224	0,152	1,0	0,77	0,97	0,60	0,18
$\alpha_{3,9}$, км^{-1}	0,082	0,046	0,77	1,0	0,59	0,46	0,27
$\Delta\alpha$, км^{-1}	0,142	0,120	0,97	0,59	1,0	0,58	0,09
e , мБар	17,39	4,06	0,60	0,46	0,58	1,0	0,70
t , °C	19,98	3,33	0,18	0,27	0,09	0,70	1,0
$\varepsilon_{8,5}$, км^{-1}	0,254	0,073	0,81	0,84	0,70	0,83	0,53
$\varepsilon_{8,6}$, км^{-1}	0,231	0,068	0,83	0,88	0,71	0,78	0,48
$\varepsilon_{9,2}$, км^{-1}	0,213	0,068	0,85	0,89	0,73	0,76	0,45
$\varepsilon_{10,2}$, км^{-1}	0,258	0,081	0,80	0,81	0,70	0,83	0,52
$\varepsilon_{10,6}$, км^{-1}	0,302	0,090	0,79	0,78	0,70	0,84	0,49
$\varepsilon_{11,1}$, км^{-1}	0,333	0,094	0,78	0,75	0,70	0,84	0,48
$\varepsilon_{11,6}$, км^{-1}	0,389	0,107	0,75	0,73	0,67	0,82	0,48

Таблица 2

Коэффициенты регрессии K_i и погрешности восстановления для разного набора входных параметров уравнения (1)

Расчитываемые параметры	Длина волны λ , мкм						
	8,3	8,6	9,2	10,2	10,6	11,1	11,6
Вариант № 1							
$\varepsilon_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e) + (K_{0\lambda}^a + K_{3\lambda} \cdot \alpha_{0,55})$							
$K_0^M \times 10^3$	6	12	6	-22	-12	-2	5
$K_1 \times 10^4$	95	76	67	109	125	135	153
$K_0^a \times 10^3$	29	30	29	33	36	39	49
$K_3 \times 10^3$	239	252	274	254	268	268	287
$\delta_\varepsilon \times 10^4$	292	295	291	329	365	394	494
Вариант № 2							
$\varepsilon_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e) + (K_{0\lambda}^a + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9})$							
$K_0^M \times 10^3$	-12	-5	-17	-45	-40	-32	-26
$K_1 \times 10^4$	100	81	76	117	135	146	164
$K_0^a \times 10^3$	16	15	16	23	29	34	43
$K_4 \times 10^3$	922	969	1003	943	960	932	1025
$\delta_\varepsilon \times 10^4$	163	149	160	231	289	338	433
Вариант № 3							
$\varepsilon_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e) + (K_{0\lambda}^a + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9} + K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha)$							
$K_0^M \times 10^3$	-6	2	-5	-35	-27	-17	-10
$K_1 \times 10^4$	95	76	67	109	125	135	153
$K_0^a \times 10^3$	16	14	15	22	28	33	43
$K_4 \times 10^3$	876	920	924	876	874	832	933
$K_5 \times 10^3$	44	46	74	63	82	95	88
$\delta_\varepsilon \times 10^4$	158	143	147	224	280	328	426
Вариант № 4							
$\varepsilon_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e + K_{2\lambda} \cdot t) + (K_{0\lambda}^a + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9})$							
$K_0^M \times 10^3$	-3	9	4	-20	1	19	26
$K_1 \times 10^4$	106	90	89	129	159	176	193
$K_2 \times 10^4$	-9	-15	-22	-20	-39	-50	-49
$K_0^a \times 10^3$	16	15	15	23	27	32	42
$K_4 \times 10^3$	918	963	993	934	942	909	1003
$\delta_\varepsilon \times 10^4$	161	145	152	226	273	317	417
Вариант № 5							
$\varepsilon_\lambda = (K_{0\lambda}^M + K_{1\lambda} \cdot e + K_{2\lambda} \cdot t) + (K_{0\lambda}^a + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9} + K_{5\lambda} \cdot \Delta z)$							
$K_0^M \times 10^3$	-5	7	1	-28	-2	18	25
$K_1 \times 10^4$	96	81	74	117	152	169	188
$K_2 \times 10^4$	-1	-7	-9	-9	-33	-44	-45
$K_0^a \times 10^3$	16	14	15	22	27	32	42
$K_4 \times 10^3$	877	928	935	887	911	882	983
$K_5 \times 10^3$	43	36	60	49	31	28	20
$\delta_\varepsilon \times 10^4$	158	143	146	224	272	317	417

В табл. 3 приведены значения коэффициентов поглощения β_λ , рассчитанные по данным табл. 2 для всех пяти комбинаций входных параметров. Из таблицы видно, что варианты расчета № 2–5 дают очень близкие величины коэффициентов β_λ , (отличия составляют менее $0,01 \text{ км}^{-1}$). Несколько завышенные значения получаются для варианта № 1, но и здесь максимальные отличия не превышают $0,015 \text{ км}^{-1}$. Более наглядно этот результат представлен на рис. 1, где сплошными кривыми приведены средние спектральные зависимости коэффициента β для различных значений температуры и влажности воздуха, с указанием максимальных разбросов β_λ для всех вариантов расчета. Близость значений β_λ , особенно для вариантов № 2–5, однозначно свидетельствует о применимости множественного регрессионного анализа для данной задачи.

Количественное сопоставление полученных значений β_λ с данными лабораторных измерений можно провести только для коэффициентов континуального поглощения паров воды β_λ^k . Для такого сравнения была использована аппроксимационная формула для β_λ^k , заимствованная из [4], расчеты по которой представлены штриховыми линиями на рис. 1 для заданных значений e и t . Видно, что в области длин волн 9–11,6 мкм, где поглощение радиации обусловлено в основном континуумом водяного пара, натурные и лабораторные данные вполне удовлетворительно согласуются между собой, особенно для средних условий (кривые 2 и 2'). На краях диапазона изменчивости e и t соответствие натуральных и лабораторных данных ухудшается, однако различие их не превышает 20%.

Таким образом, проведенный анализ показал, что в целом при измерениях в реальной атмосфере зависимость коэффициента поглощения от парциального давления паров воды оказывается близкой к линейной, что соответствует выводам [5] и противоречит результатам теоретических [1, 2] и лабораторных (кюветных) исследований [3, 4]. Противоречие это обусловлено тем, что в атмосфере парциальное давление паров воды положительно коррелирует с температурой воздуха, в результате чего отрицательная зависимость β_λ от температуры, обнаруженная в [3, 4], компенсирует квадратичную положительную зависимость β_λ от e , трансформируя ее в линейную в широком диапазоне изменчивости e .

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициентов поглощения $\beta_\lambda, \text{ км}^{-1}$
для различных вариантов расчета при $e = 17,4 \text{ мбар}$, $t = 20^\circ\text{C}$

$\lambda, \text{ мкм}$	Варианты расчета				
	1	2	3	4	5
8,30	0,171	0,162	0,159	0,163	0,160
8,60	0,144	0,136	0,134	0,136	0,134
9,20	0,123	0,115	0,112	0,115	0,112
10,20	0,168	0,159	0,155	0,162	0,157
10,60	0,206	0,195	0,191	0,200	0,196
11,10	0,234	0,222	0,218	0,225	0,224
11,60	0,271	0,262	0,256	0,264	0,262

В этой связи выявление зависимости β_λ от температуры в натурном эксперименте представляет особый интерес. Сложность этой задачи обусловлена значительными вариациями аэрозольного ослабления, которые полностью маскируют зависимость β_λ от t , что и явилось причиной того, что до последнего времени эта зависимость не была обнаружена. Применение множественного регрессионного анализа при обработке натуральных измерений позволило нам решить задачу, в результате чего была уверенно выявлена зависимость β_λ от t во всем диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм. Подтверждением тому служат результаты расчетов температурных коэффициентов $K_{2\lambda}$ для вариантов № 4 и 5 (см. табл. 2), которые во всем диапазоне длин волн оказались отрицательными, что соответствует данным лабораторных исследований [3, 4]. Кроме того, расчеты показали, что температурный коэффициент имеет довольно выраженную спектральную зависимость, вид которой приведен на рис. 2 для варианта № 4 (кривая 1) и № 5 (кривая 2). Из рисунка видно, что в диапазоне 8,3–10,2 мкм температурная зависимость проявляется слабо (особенно для варианта № 5), а при $\lambda > 10,2 \text{ мкм}$ резко возрастает, достигая величины $0,004–0,005 \text{ км}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$.

В случае если в расчетах не учитывается влияние мелкодисперсного аэрозоля (вариант № 4), то температурная зависимость $K_{2\lambda}$ оказывается искусственно завышенной во всей области длин волн, причем в большей степени в диапазоне $\lambda = 8,3–10,2 \text{ мкм}$, где имеет место полоса поглощения аэрозоля ($\lambda = 9,2 \text{ мкм}$) [8]. Последнее наглядно демонстрирует эффект опосредованного влияния относительной влажности воздуха, который заключается в том, что при фиксированных значениях абсолютной влажности воздуха, в силу взаимообусловленности метеопараметров атмосферы, изменение температуры приводит к детерминированному изменению (с противоположным знаком) относительной влажности воздуха и соответствующему изменению аэрозольной компоненты ослабления, которое может быть интерпретировано как проявление отрицательной температурной зависимости в континууме водяного пара.

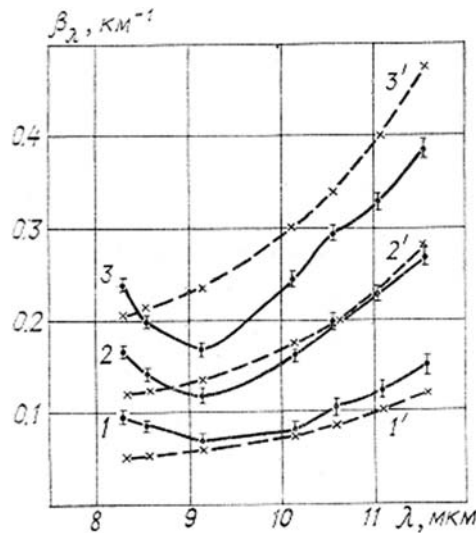


Рис. 1. Спектральные коэффициенты молекулярного поглощения, полученные в настоящей работе (сплошные кривые) и рассчитанные по данным [4] (штриховые кривые): 1 — $e = 10$ мбар, $t = 15^\circ\text{C}$; 2 — $e = 17,4$ мбар, $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $e = 25$ мбар, $t = 25^\circ\text{C}$

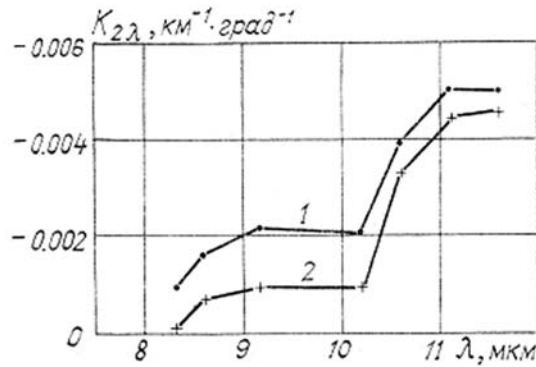


Рис. 2. Спектральный ход температурного коэффициента: 1 — расчет по схеме № 4; 2 — расчет по схеме № 5 (см. табл. 2)

Вопрос о роли мелкодисперсного аэрозоля в поглощении ИК радиации обсуждается в литературе уже сравнительно давно [9, 10], однако оценить его вклад непосредственно из измерений прозрачности атмосферы до настоящего времени не удалось. Сложность такой оценки состоит не только в выделении вклада поглощения мелкодисперсного аэрозоля на фоне ослабления грубодисперсной фракции, но также и в указанной выше неопределенности в интерпретации экспериментальных данных при изменении температуры воздуха. Применение множественного регрессионного анализа позволило решить эту задачу одновременным введением в уравнение регрессии входных параметров $\alpha_{3,9}$, e , t и $\Delta\alpha = \alpha_{0,55} - \alpha_{3,9}$ (вариант № 5). В этом случае коэффициент $K_{5\lambda}$ отражает долю вариаций ϵ_{λ} коррелирующих с параметром $\Delta\alpha$, а величина $K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha$ представляет собой составляющую ϵ_{λ} , обусловленную поглощением ИК радиации мелкодисперсным аэрозолем. На рис. 3 показана спектральная зависимость коэффициента K_5 для двух вариантов расчета с учетом (кривая 2, вариант № 5) и без учета температуры (кривая 1, вариант № 3). Видно, что введение температуры в качестве параметра качественно изменяет спектральную структуру коэффициента K_5 , выявляя максимум поглощения мелкодисперсного аэрозоля в области $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$, что соответствует литературным данным [8–10]. В случае, если температурную зависимость не учесть, то в спектре K_5 появляется ложный подъем в области $\lambda > 10,2 \mu\text{m}$.

Представляет интерес оценка вклада компоненты, обусловленной поглощением мелкодисперсной фракции аэрозоля $\alpha_{\lambda}^{\text{м.ф.}} = K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha$ общее аэрозольное ослабление α_{λ} . Для этой цели была рассчитана величина относительного вклада этой компоненты с помощью выражения:

$$\frac{\alpha_{\lambda}^{\text{м.ф.}}}{\alpha_{\lambda}} = \frac{K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha}{K_{0\lambda}^a + K_{4\lambda} \cdot \alpha_{3,9} + K_{5\lambda} \cdot \Delta\alpha}$$

Расчет был проведен для метеорологической дальности видимости 40, 20, 10 и 5 км, результаты представлены на рис. 4 (кривые 1–4 соответственно). Из рисунка видно, что относительный вклад в ослабление радиации мелкодисперсной фракции составляет в максимуме ($\lambda = 9,2$ мкм) при видимости $S_m = 5$ км менее 15% от суммарного аэрозольного ослабления.

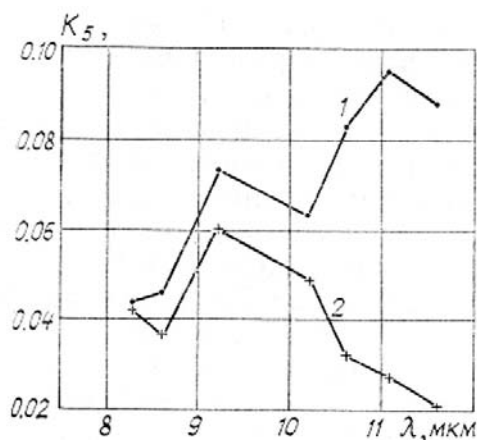


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения субмикронного аэрозоля от длины волны: 1 — расчет по схеме № 3; 2 — расчет по схеме № 5 (см. табл. 2)

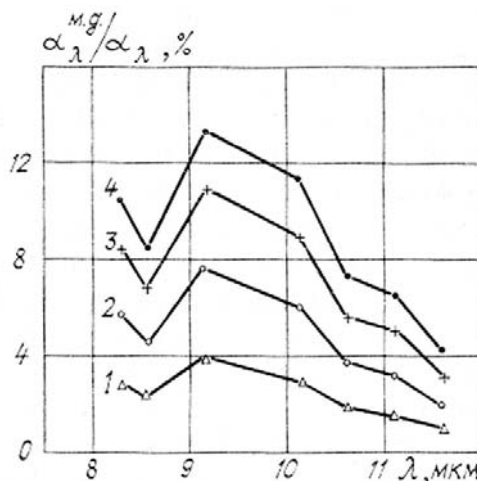


Рис. 4. Относительный вклад поглощения субмикронным аэрозолем в общее аэрозольное ослабление в окне прозрачности 8–12 мкм в зависимости от метеорологической дальности видимости: 1–40 км; 2–20 км; 3–10 км; 4–5 км

Основные результаты данной работы сводятся к следующему:

1. Показана применимость статистического способа разделения общих коэффициентов ослабления на аэрозольную и молекулярную компоненты независимо от числа входных параметров в уравнении множественной регрессии.
2. Установлена возможность выявления температурной зависимости континуума водяного пара в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм при статистической обработке натуральных данных.
3. Проведена оценка вклада поглощения мелкодисперсной фракции аэрозоля в общее аэрозольное ослабление радиации в дымках прибрежного морского района в диапазоне 8–12 мкм.

1. Несмелова Л.И., Творогов С.Д., Фомин В.В. Спектроскопия крыльев линий. — Новосибирск: Наука, 1977. — 141 с.
2. Фомин В.В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности. — Новосибирск: Наука, 1986. — 234 с.
3. Roberts R.E., Selby J.E.A., Viberman L.M. — Appl. Opt., 1976, v. 15, № 9, p. 2085.
4. Арефьев В.Н., Погодаев Б.Н., Сизов Н.И. — Тр. ИЭМ, в. 14 (ПО). М: Гидрометеоздат, 1984, с. 86.
5. Макаров А.С., Филиппов В.Л. — Изв. вузов, Радиопизика, 1978, т. XXI, № 3, с. 368.
6. Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. — В кн.: Оптика моря и атмосферы (Тез. докл.). Л., 1984, с. 282.
7. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975. — 648 с.

8. Андреев С.Д., Зуев В.Е., Ивлев Л.С., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А. — Изв. АН СССР. ФАО, 1972, т. 8, № 12, с. 1261.
9. Любовцева Ю.С. — ДАН СССР, 1981, т. 257, № 2, с. 319.
10. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. — Изв. АН СССР. ФАО, 1980, т. 16, № 9, с. 907.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
4 января 1988 г.

Yu. A. Pkhalagov, V. N. Uzhegov. On the Use of Multiple Regression Analysis for Interpreting Radiation Attenuation in the 8–12 μm Range.

The statistical characteristics of radiation attenuation coefficients ε_λ and meteorological parameters of the atmosphere in the coastal zone are given in the paper. Different variants of ε_λ restitution with the use of the fiveparameter regression equation are treated. This method is shown to be applicable for separating ε_λ into aerosol and molecular components as well as for determining the temperature dependence of the continuous water–vapor absorption coefficient and contribution of fine aerosol absorption to the total aerosol attenuation in the 8–12 μm range.