

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551.521.3

Н.Н. Щелканов

**ВЛИЯНИЕ АЭРОЗОЛЯ НА ОЦЕНКУ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОНТИНУУМА ВОДЯНОГО ПАРА В ОБЛАСТИ 8–12 МКМ**

На основе экспериментальных данных [1] показано, что наличие в исследуемом объеме субмикронного аэрозоля, ослабление которого в видимой области спектра зависит от относительной влажности воздуха, может привести к существенному завышению оценок отрицательной температурной зависимости континуума водяного пара в области 8–12 мкм.

При исследовании континуального поглощения парами воды в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм как в лабораторных, так и в натуральных условиях возникает необходимость корректного исключения аэрозольной компоненты ослабления. Неучет этой компоненты может приводить, с одной стороны, к очевидному завышению оценок коэффициентов континуального поглощения, а с другой – к искажению их температурной зависимости.

Для пояснения второго утверждения проведем следующие рассуждения.

Известно, что аэрозольное ослабление увеличивается с ростом относительной влажности воздуха. И если построить зависимость коэффициента аэрозольного ослабления от абсолютной влажности воздуха для нескольких фиксированных значений температуры (как это делается для коэффициентов континуального поглощения), то видно, что аэрозольное ослабление, так же как и континуальное поглощение, имеет отрицательную температурную зависимость. Таким образом, при исследовании континуума водяного пара нужно оценивать не только величину коэффициентов аэрозольного ослабления, но и их температурную зависимость.

Для оценки температурной зависимости аэрозольного ослабления воспользуемся экспериментальными данными, полученными при исследовании континуума водяного пара в лабораторной кювете и опубликованными в работе [1], где приведены зависимости пропускания лазерного излучения на двух длинах волн – 0,44 и 0,63 мкм – от относительной влажности воздуха. В [1] показано, что ослабление излучения на этих длинах волн практически полностью обусловлено рассеянием на обводненном аэрозоле субмикронных размеров, поэтому для оценки коэффициентов аэрозольного поглощения α_a^n в области $\lambda = 8–12$ мкм можно воспользоваться формулой Рэлея [2]

$$\alpha_a^n(\lambda) = \frac{V}{\lambda} \frac{36\pi m \kappa}{(m^2 - \kappa^2 + 2)^2 + 4m^2 \kappa^2},$$

где m и κ – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления частиц субмикронного аэрозоля; V – удельный объем аэрозольного вещества (фактор заполнения). Оптические постоянные аэрозольных частиц рассчитывались по правилу смеси, как это сделано в [3],

$$m = (m_c - m_b)(V_c/V) + m_b, \quad \kappa = (\kappa_c - \kappa_b)(V_c/V) + \kappa_b,$$

где m_c , κ_c , V_c , m_b , κ_b , V_b – оптические постоянные и удельный объем сухого аэрозольного вещества и воды соответственно; $V = V_c + V_b$ – удельный объем аэрозольных частиц.

Оценки коэффициентов аэрозольного поглощения выполнены для длины волны 10,6 мкм. Значения оптических констант сухого аэрозольного вещества и воды [4] для трех вариантов расчета $\alpha_a^n(10,6)$ приведены в табл. 1. Первый вариант соответствует поглощению чистой водой, для второго варианта оптические постоянные для сухого аэрозольного вещества взяты из [5], а для третьего – m_c и $\kappa_c = 1,5$. Факторы заполнения V_c и V_b вычислялись по однопараметрической модели [6], где входным параметром являлся коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм.

Оптические постоянные сухого аэрозольного вещества и воды [4] в области 10,6 мкм

N	m_c	κ_c	m_b	κ_b
1	1,143	0,07	1,143	0,07
2	1,5	0,7	1,143	0,07
3	1,5	1,5	1,143	0,07

Следует заметить, что формулы для нахождения V_c и V_b получены для реальных атмосферных условий, поэтому критерием достоверности рассчитанных коэффициентов аэрозольного поглощения служили не значения оптических постоянных сухого аэрозольного вещества, а результаты сравнения $\alpha_a^n(10,6)$ с оценками вклада кюветного аэрозоля в ослабление излучения 10,6 мкм, приведенными в [1, 7, 8]. В качестве исходного материала для нахождения коэффициента $\alpha(0,55)$ использовались данные о пропускании излучения на длинах волн 0,44 и 0,63 мкм [1]. Для интерполяции аэрозольного ослабления в область 0,55 мкм применялась формула Ангстрема [9]. Значения полученных коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(0,55)$ и соответствующих им относительных влажностей воздуха r приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм и соответствующие им относительные влажности воздуха в лабораторной кювете [1]

$\alpha(0,55), \text{км}^{-1}$	0,02	0,03	0,05	0,07	0,13	0,18
$r, \%$	30	45	60	75	90	95

Результаты расчета коэффициентов аэрозольного поглощения субмикронным аэрозолем для области 10,6 мкм в зависимости от относительной влажности воздуха представлены на рис. 1. При увеличении r от 30 до 95% коэффициенты $\alpha_a^n(10,6)$ изменяются в следующих пределах: для первого варианта расчета от 0,0006 до 0,0027 км^{-1} ; для второго – от 0,0040 до 0,0139 км^{-1} ; для третьего – от 0,0073 до 0,0281 км^{-1} .

В [1, 7, 8] обсуждается вопрос о влиянии аэрозоля на оценку континуума водяного пара в лабораторной кювете. В [7] указывается, что «при относительных влажностях $r < 75\text{--}80\%$ ($t = 20^\circ\text{C}$, абсолютная влажность $a < 13\text{--}14 \text{ г/м}^3$) вклад обводненного аэрозоля в поглощение лазерного излучения 10,6 мкм в кюветных экспериментах даже в предельном случае не превышает 12–15%». В табл. 3 представлены коэффициенты аэрозольного $\alpha_a^n(10,6)$ и континуального $\alpha_k(10,6)$ [10] поглощения и их отношения, выраженные в процентах, для трех вариантов расчета $\alpha_a^n(10,6)$, двух значений a и для разных относительных влажностей r (в скобках указана температура воздуха t). Из таблицы видно, что для $r < 80\%$ ($t = 20^\circ\text{C}$, $a < 14 \text{ г/м}^3$) рассчитанные значения $\alpha_a^n(10,6)/\alpha_k(10,6) \cdot 100\%$ для первого варианта расчета не превышают 0,6, для второго – 4, для третьего – 7%. Таким образом, даже в крайнем случае значение $\alpha_a^n(10,6)$ оказалось примерно в два раза меньше оценки [7] вклада кюветного аэрозоля в ослабление излучения 10,6 мкм.

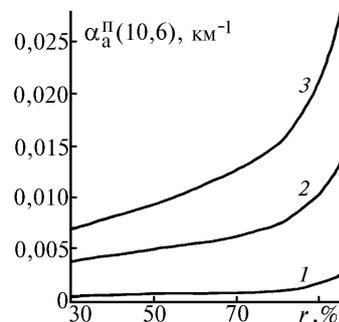


Рис. 1. Зависимость коэффициента аэрозольного поглощения субмикронного аэрозоля в области 10,6 мкм от относительной влажности воздуха для трех вариантов расчета $\alpha_a^n(10,6)$ (1 – $m_c=1,143$, $\kappa_c=0,07$; 2 – $m_c=1,5$, $\kappa_c=0,7$; 3 – $m_c=1,5$, $\kappa_c=1,5$)

Коэффициенты аэрозольного $\alpha_a^n(10,6)$, континуального $\alpha_k(10,6)$ [10] поглощения и их отношения $\alpha_a^n(10,6)/\alpha_k(10,6) \cdot 100\%$ для разных относительных влажностей воздуха r (в скобках указаны соответствующие температуры t)

$r, \%$ ($t, ^\circ\text{C}$)	$\alpha_k(10,6), \text{км}^{-1}$	$\kappa_c = 0,07$		$\kappa_c = 0,7$		$\kappa_c = 1,5$	
		$\alpha_a^n(10,6), \text{км}^{-1}$	$\alpha_a^n/\alpha_k \cdot 100\%$	$\alpha_a^n(10,6), \text{км}^{-1}$	$\alpha_a^n/\alpha_k \cdot 100\%$	$\alpha_a^n(10,6), \text{км}^{-1}$	$\alpha_a^n/\alpha_k \cdot 100\%$
$a = 10 \text{ г/м}^3$							
33(30)	0,1095	0,0006	0,5	0,0041	4	0,0076	7
46(24)	0,1196	0,0007	0,6	0,0047	4	0,0090	8
65(18)	0,1319	0,0010	0,8	0,0061	5	0,0118	9
78(15)	0,1391	0,0012	0,9	0,0075	5	0,0147	11
94(12)	0,1470	0,0025	1,7	0,0133	9	0,0269	18
$a = 14 \text{ г/м}^3$							
33(36)	0,1786	0,0006	0,3	0,0041	2	0,0076	4
46(30)	0,1954	0,0007	0,4	0,0047	2	0,0090	5
64(24)	0,2158	0,0010	0,5	0,0060	3	0,0117	5
76(21)	0,2275	0,0012	0,5	0,0072	3	0,0140	6
80(20)	0,2317	0,0015	0,6	0,0083	4	0,0164	7
91(18)	0,2405	0,0022	0,9	0,0114	5	0,0229	10

В [1] для дополнительной оценки возможного вклада аэрозоля в ослабление излучения 10,6 мкм в лабораторной кювете приведен спектральный ход коэффициентов ослабления, рассеяния и поглощения, рассчитанный по теории Ми для $r = 50\%$ и видимости 50 км, взятый из [11]. В расчетах [11] использовалось трехмодальное логнормальное распределение частиц по размерам с радиусами 0,0085; 0,036 и 0,51 мкм при концентрациях $5 \cdot 10^4$, $28 \cdot 10^3$ и 4 частиц в 1 см^3 соответственно. При указанных выше условиях коэффициент аэрозольного ослабления в области 10,6 мкм оказался равным $\sim 0,02 \text{ км}^{-1}$. В лабораторной кювете видимости 50 км ($\alpha(0,55) \approx 0,07 \text{ км}^{-1}$) соответствует относительная влажность 75%, а не 50, как в [11], и при этом значение $\alpha_a^n(10,6)$ для третьего варианта составило $0,014 \text{ км}^{-1}$. Таким образом, рассчитанные значения $\alpha_a^n(10,6)$ не превышают оценок аэрозольного ослабления в лабораторной кювете, выполненных в [1, 7, 8].

Далее рассмотрим, как неучет зависимости аэрозольного ослабления от относительной влажности воздуха сказывается на оценке температурной зависимости континуума водяного пара. В [1] указывается, что экспериментальные точки, определяющие зависимость пропускания на длинах волн 0,44 и 0,63 мкм от относительной влажности, при различных температурах воздуха располагаются практически на одной кривой. Учитывая это обстоятельство, построим зависимости $\alpha_a^n(10,6)$ от абсолютной влажности при разных температурах. На рис. 2 представлены такие зависимости для $m_c = 1,5$, $\kappa_c = 0,7$ и пяти значений температур воздуха. Из рисунка видно, что аэрозольное ослабление обладает отрицательной температурной зависимостью, т.е. $\alpha_a^n(10,6)$ увеличивается с уменьшением температуры воздуха (при постоянной абсолютной влажности). Таким образом, наличие аэрозоля в лабораторной кювете при исследовании в ней континуума водяного пара будет приводить к завышенным оценкам его отрицательной температурной зависимости.

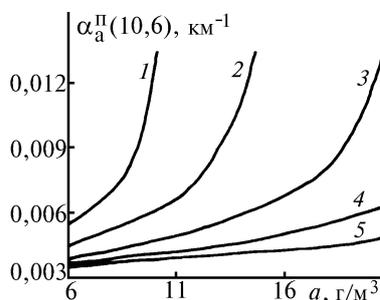


Рис. 2. Зависимость коэффициента аэрозольного поглощения субмикронного аэрозоля в области 10,6 мкм от абсолютной влажности воздуха для $m_c = 1,5$, $\kappa_c = 0,7$ и пяти значений температур воздуха (для кривых 1, 2, 3, 4, 5 соответственно $t = 12; 18; 24; 30; 36^\circ\text{C}$)

Для оценки возможного завышения температурной зависимости континуального поглощения в табл. 4 приведены температурные коэффициенты аэрозольного $K_a = [\alpha_a^n(r_2) - \alpha_a^n(r_1)] / (t_2 - t_1)$, континуального $K_k = [\alpha_k(r_2) - \alpha_k(r_1)] / (t_2 - t_1)$ [10] поглощения и их отношения $K_a/K_k \cdot 100\%$ для различных диапазонов относительной влажности воздуха $r_1 \div r_2$ (в скобках указаны соответствующие температуры $t_1 \div t_2$), двух значений абсолютной влажности a и трех вариантов расчета $\alpha_a^n(10,6)$. Вклад аэрозоля в оценку температурной зависимости континуума водяного пара возрастает с увеличением относительной влажности воздуха и уменьшается с ростом абсолютной влажности. Из табл. 3 и 4 видно, что субмикронный аэрозоль [1] примерно в 2–10 раз сильнее искажает оценку температурной зависимости континуума, чем величину оцениваемых коэффициентов континуального поглощения $\alpha_k(10,6)$. Это объясняется тем, что температурный коэффициент аэрозольного поглощения K_a , представляющий собой первую производную от $\alpha_a^n(10,6)$ по температуре воздуха (при фиксированной абсолютной влажности воздуха), изменяется значительно быстрее, чем коэффициент $\alpha_a^n(10,6)$ в зависимости от t . Так, для $a = 10 \text{ г/м}^3$, $\kappa_c = 0,7$ и при переходе от диапазона влажностей 33–46 к 78–94% K_a увеличивается в 19 раз, а при изменении r от 33 до 94 % $\alpha_a^n(10,6)$ возрастает в 3,2 раза. При этом значения коэффициентов K_k и $\alpha_k(10,6)$ изменяются соответственно в 1,6 и 1,3 раза. В результате кюветный аэрозоль большее влияние оказывает на оценку температурной зависимости коэффициентов континуального поглощения. При $a = 10 \text{ г/м}^3$ и для диапазона $r_1 \div r_2 = 33\text{--}94\%$ неучет ослабления субмикронным аэрозолем с $\kappa_c = 0,07; 0,7$ и $1,5$ будет приводить к завышению оценок температурной зависимости континуума на 5, 25 и 51% соответственно.

Т а б л и ц а 4

Температурные коэффициенты аэрозольного K_a , континуального K_k [10] поглощения и их отношения $K_a/K_k \cdot 100\%$ для разных диапазонов относительной влажности воздуха $r_1 \div r_2$ (в скобках указаны соответствующие температуры $t_1 \div t_2$)

$r_1 \div r_2, \%$ ($t_1 \div t_2, \text{°C}$)	$K_k, \text{км}^{-1} \text{град}^{-1}$	$\kappa_c = 0,07$		$\kappa_c = 0,7$		$\kappa_c = 1,5$	
		$K_a, \text{км}^{-1} \text{град}^{-1}$	$K_a/K_k \cdot 100\%$	$K_a, \text{км}^{-1} \text{град}^{-1}$	$K_a/K_k \cdot 100\%$	$K_a, \text{км}^{-1} \text{град}^{-1}$	$K_a/K_k \cdot 100\%$
$a = 10 \text{ г/м}^3$							
33–46 (30–24)	– 0,00168	– 0,00002	1	– 0,00010	6	– 0,00023	14
46–65 (24–18)	– 0,00205	– 0,00004	2	– 0,00023	11	– 0,00047	23
65–78 (18–15)	– 0,00240	– 0,00009	4	– 0,00047	20	– 0,00097	40
78–94 (15–12)	– 0,00263	– 0,00042	16	– 0,00193	73	– 0,00407	155
33–94 (30–12)	– 0,00208	– 0,00011	5	– 0,00051	25	– 0,00107	51
$a = 14 \text{ г/м}^3$							
33–46 (36–30)	– 0,00260	– 0,00002	1	– 0,00010	4	– 0,00023	9
46–64 (30–24)	– 0,00340	– 0,00004	1	– 0,00022	6	– 0,00045	13
64–76 (24–21)	– 0,00390	– 0,00007	2	– 0,00040	10	– 0,00077	20
76–91 (21–18)	– 0,00433	– 0,00036	8	– 0,00140	32	– 0,00297	69
33–91 (36–18)	– 0,00344	– 0,00009	3	– 0,00041	12	– 0,00085	25

Таким образом, при экспериментальном изучении температурной зависимости континуума водяного пара в области спектра 8–12 мкм особо тщательно нужно подходить к вопросу об исключении даже небольшого аэрозольного ослабления, зависящего от относительной влажности воздуха.

1. А р е ф ь е в В. Н. , С и з о в Н. И. // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 14(110). С. 93–99.
2. О п т и ч е с к и е свойства прибрежных атмосферных дымок / М.В. Кабанов, М.В. Панченко, Ю.А. Пхалагов и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
3. П а н ч е н к о М. В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 4. С. 25–29.

4. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.
5. Габелко Л. Б., Любовцева Ю. С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. N 8. С. 715–724.
6. Веретенников В. В., Кабанов М. В., Панченко М. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. N 10. С. 1042–1049.
7. Арёфьев В. Н., Дианов-Клоков В. И. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. N 4. С. 923–926.
8. Арёфьев В. Н., Дианов-Клоков В. И., Сизов Н. И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 12. С. 1318–1321.
9. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации // Л.: Гидрометеиздат, 1968.
10. Арёфьев В. Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 10. С. 1034–1054.
11. Nilsson В. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 20. P. 3457–3473.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
8 декабря 1995 г.

N. N. Shchelkanov. Influence of Aerosol on Estimate of Temperature Dependence of Water Vapor Continuum within 8–12 μm Region.

The submicron aerosol, the attenuation of which in the visible spectral range depends on the air relative humidity, can cause significant overestimation of the negative temperature dependence of the water vapor continuum within 8–12 μm region. This conclusion was drawn based on the experimental data obtained in the laboratory cell [1].