

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужегов

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ В ДЫМКАХ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЯ

В работе приводятся статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления видимого и ИК. излучения, полученных в результате многолетних измерений прозрачности атмосферы в дымках прибрежной зоны Черного моря. Предложена эмпирическая модель восстановления спектральной структуры коэффициентов аэрозольного ослабления в ИК области спектра по измеренному значению в видимой области для  $\lambda = 0,55$  мкм.

Известно, что временные вариации ослабления оптического излучения в приземных дымках носят случайный характер, обусловленный прежде всего сильной изменчивостью аэрозольной компоненты атмосферы. Большое число факторов, постоянно воздействующих на атмосферный аэрозоль, приводит к непрерывному изменению дисперсного состава и комплексного показателя преломления взвешенных в воздухе частиц, что в свою очередь ведет не только к изменению абсолютных значений коэффициента аэрозольного ослабления, но и к трансформации его спектральной структуры. Последнее обстоятельство особенно важно учитывать при моделировании оптических параметров атмосферных дымков в широком диапазоне длин волн.

Наиболее перспективным в этой проблеме является эмпирический подход, когда моделирование оптических параметров атмосферы для конкретного региона основывается на статистически обеспеченном массиве экспериментальных данных, учитывающем все наиболее характерные для этого региона особенности аэрозольной компоненты и ее возможную трансформацию.

В последние двадцать лет достаточно полно были исследованы статистические характеристики ослабления оптического излучения в континентальных дымках Европейской территории страны (ЕТС) [1–4]. Использование статистического подхода дало возможность выявить связь коэффициентов аэрозольного ослабления с влажностью воздуха, установить наличие корреляции аэрозольного ослабления радиации в разных спектральных интервалах, проанализировать влияние на спектральную структуру ослабления синоптического фактора и сезонов года. На основе этих исследований были также разработаны эмпирические модели восстановления спектральных коэффициентов ослабления излучения в дымках приземного слоя [5, 6].

В данной работе впервые рассматриваются статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в широком диапазоне длин волн в дымках прибрежного района. Специфичность атмосферы прибрежной зоны, обусловленная наличием двух мощных источников различного аэрозоля (море и суша), переносимого бризовой циркуляцией воздуха, определяет интерес к ее исследованию как с научной стороны, так и со стороны инженерных задач.

Исследования проводились в период с 1974 по 1981 гг. в различных пунктах Черноморского побережья Крыма в теплые сезоны года на трассах протяженностью 4–8 км, проходящих над морской поверхностью. Измерения осуществлялись в 20-ти дискретных спектральных интервалах, соответствующих окнам прозрачности атмосферы в диапазоне длин волн 0,48–11,9 мкм, с разрешением 0,01–0,02 мкм в области 0,48–1,06 мкм и 0,15–0,20 мкм в области 1,25–12 мкм [7]. Низкое спектральное разрешение в ИК-диапазоне, выбранное исходя из энергетических возможностей установки при работе на протяженных трассах, предопределило необходимость проведения коррекции получаемых коэффициентов ослабления на молекулярное поглощение парами воды и другими атмосферными газами. Такая коррекция была проведена нами статистически, с помощью множественного регрессионного анализа [8].

Из полученных в разные годы массивов коэффициентов аэрозольного ослабления была сформирована генеральная совокупность данных, насчитывающая около 800 отдельных реализаций, каждая из которых, в свою очередь, получена осреднением из 3–4 серий измерений.

Одновременно с оптическими исследованиями осуществлялись измерения метеопараметров атмосферы: относительной влажности воздуха ( $R$ ), парциального давления паров воды ( $e$ ), температуры воздуха ( $t$ ), а также скорости ветра ( $V$ ) и его направления (ветер с моря, ветер с суши).

Средние значения измеряемых параметров и их среднеквадратические отклонения (СКО) приведены в табл. 1.

Указанное в табл. 1 значение коэффициента аэрозольного ослабления на длине волны  $\lambda=0,55$  мкм характеризует среднее значение видимости в прибрежной зоне и ее динамику.

В табл. 2 приведено распределение числа измерений ( $N$ ) по диапазонам изменчивости параметров  $R$ ,  $e$ ,  $t$  и  $\alpha_{0,55}$ , позволяющее наиболее наглядно проанализировать статистическую обеспеченность проведенных исследований.

Таблица 1

Оцениваемые величины	Измеренные параметры					
	$R$ , %	$e$ , мбар	$t$ , °C	$V$ , м/с	Ветер с моря, %	$\alpha_{0,55}$ , км <sup>-1</sup>
Среднее	68,29	16,48	20,40	3,22	50	0,186
СКО	12,65	3,88	3,77	2,5	—	0,112

Таблица 2

Распределение числа измерений по диапазонам изменчивости  $R$ ,  $e$ ,  $t$  и  $\alpha_{0,55}$ 

$R$ , %	$N_R$	$e$ , мбар	$N_e$	$t$ , °C	$N_t$	$\alpha_{0,55}$ , км <sup>-1</sup>	$N_\alpha$
<40	2	<7,5	12	5—10	16	<0,1	99
40—50	33	7,5—10	21	10—15	52	0,1—0,2	386
50—60	126	10—12,5	91	15—20	278	0,2—0,3	181
60—70	236	12,5—15	152	20—24	405	0,3—0,4	92
70—80	215	15—17,5	170	25—30	63	0,4—0,5	34
80—90	154	17,5—20	186			0,5—0,6	11
>90	48	20—22,5	130			>0,5	11
		22,5—25	51				
		25—27,5	1				

Статистическая обработка массива предполагала получение средних значений измеряемых величин, их среднеквадратических отклонений  $\sigma$ , коэффициентов автокорреляции между аэрозольным ослаблением в разных спектральных интервалах  $\rho_{\alpha,\alpha}$  и коэффициентов взаимной корреляции между аэрозольным ослаблением и метеопараметрами атмосферы  $\rho_{\alpha,x}$ , где  $x$  — условное обозначение метеопараметров  $R$ ,  $e$  и  $t$ . Результаты обработки представлены в табл. 3.

В примечании к таблице приведены коэффициенты взаимной корреляции между метеопараметрами атмосферы,  $\rho_{Re}$ ,  $\rho_{Rt}$  и  $\rho_{et}$ , которые могут быть использованы при физической интерпретации результатов исследований.

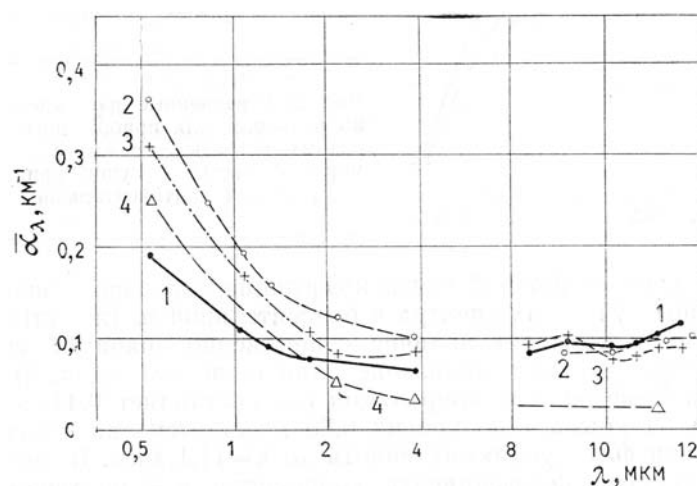


Рис. 1. Средние значения спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления: для прибрежной зоны моря — кривая 1 и для континентальных условий — кривая 2 — [5], 3 — [6], 4 — [4]

Анализ данных табл. 3 показывает, что в прибрежной зоне моря средняя спектральная структура коэффициентов аэрозольного ослабления представляет собой довольно плавную кривую с минимумом в области длины волны 3,97 мкм. Наиболее характерной ее чертой является высокий уровень аэрозольного ослабления в диапазоне 8—12 мкм, составляющей около 0,10 км<sup>-1</sup>, при средней видимости 18—20 км. Сопоставление с соответствующими средними данными для континентальных дымок [4—6], представленное на рис. 1, показывает, что подобный уровень аэрозольного ослабления в области 8—12 мкм имеет место при видимостях 11—12 км (кривые 2 и 3) и менее (кривая 4). Физическая интерпретация более

высокого уровня коэффициентов аэрозольного ослабления в ИК-диапазоне длин волн в дымках прибрежной зоны состоит в повышенной концентрации грубодисперсного солевого аэрозоля, генерируемого морской поверхностью [9].

Таблица 3

Статистические характеристики генеральной совокупности оптических и метеорологических \* данных в дымках прибрежной зоны

$\lambda$ , МКМ	$\alpha_{\lambda}$ , КМ <sup>-1</sup>	$\sigma_{\alpha}$ , КМ <sup>-1</sup>	$\rho_{\alpha, \sigma_j}$					$\rho_{\alpha R}$	$\rho_{\alpha e}$	$\rho_{\alpha t}$
			$\alpha_{0,55}$	$\alpha_{1,06}$	$\alpha_{2,2}$	$\alpha_{3,97}$	$\alpha_{10,6}$			
0,55	0,136	0,112	1,0					0,44	0,46	0,14
0,69	0,162	0,087	0,99					0,43	0,45	0,13
1,06	0,112	0,062	0,93	1,0				0,41	0,46	0,15
1,25	0,098	0,057	0,89	0,98				0,36	0,44	0,19
1,60	0,081	0,049	0,82	0,94				0,30	0,45	0,24
2,20	0,077	0,048	0,75	0,89	1,0			0,30	0,45	0,22
3,97	0,069	0,044	0,70	0,85	0,97	1,0		0,36	0,42	0,16
8,60	0,085	0,051	0,65	0,79	0,89	0,90	0,91	0,24	0,34	0,17
9,20	0,092	0,053	0,69	0,82	0,89	0,90	0,91	0,27	0,38	0,19
10,20	0,091	0,053	0,67	0,79	0,86	0,89	0,97	0,32	0,34	0,11
10,60	0,096	0,054	0,66	0,76	0,81	0,84	1,0	0,32	0,29	0,05
11,10	0,102	0,056	0,64	0,72	0,74	0,78	0,96	0,28	0,22	-0,04

\*  $\rho_{eR}=0,51$ ;  $\rho_{eI}=0,64$ ;  $\rho_{It}=-0,30$ .

Это предположение вполне убедительно подтверждают микрофизические исследования прибрежного аэрозоля [10], представленные на рис. 2 в виде усредненных распределений частиц по размерам для слу-

чая ветра с моря (кривая 1) и суши (кривая 2) в сравнении с данными, полученными на континенте (кривая 3) [11]. Из рисунка видно, что в прибрежной зоне концентрация грубодисперсного аэрозоля в среднем выше, чем в континентальном районе, а увеличение ее при ветре с моря свидетельствует о морской природе грубодисперсных частиц.

Следует заметить, что для морских дымок факт повышенной концентрации крупных частиц известен давно, а настоящие исследования распространяют его и на случай дымки прибрежного района.

Возвращаясь к табл. 3 отметим сравнительно высокую корреляцию аэрозольного ослабления в видимой области спектра ( $\alpha_{0,55}$ ) с коэффициентами  $\alpha_\lambda$  в ИК-диапазоне длин волн, которая значительно превышает уровень существенно значимой корреляции для 800 реализаций, составляющий менее 0,18. Можно предположить, что такой уровень корреляции коэффициентов аэрозольного ослабления в прибрежной зоне моря обеспечивают два основных физических процесса. Первый процесс — это скоррелированный вынос с поверхности моря мелко- и грубодисперсного аэрозоля за счет пузырькового механизма генерации морского аэрозоля [9]. Второй процесс — адекватное влияние относительной влажности воздуха на гигроскопичный солевой аэрозоль разных размеров, приводящий к скоррелированным вариациям аэрозольного ослабления в видимой и ИК-областях спектра.

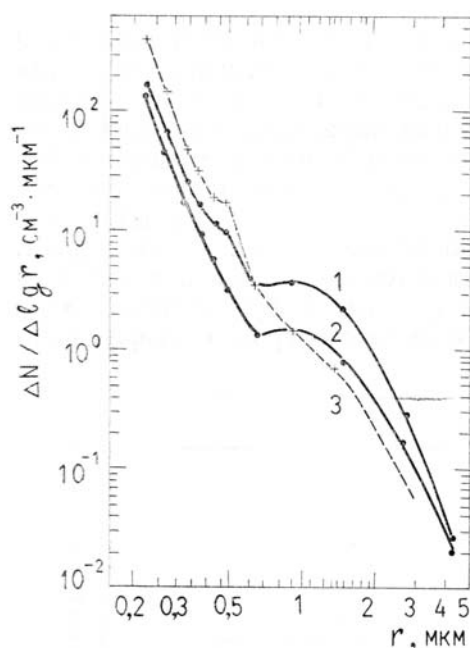


Рис. 2. Усредненные распределения частиц по размерам для прибрежного района при разных ветровых режимах: 1 — ветер с моря; 2 — ветер с суши; кривая 3 — данные для континентального района

Анализ корреляционной связи коэффициентов аэрозольного ослабления в разных участках спектра с относительной влажностью воздуха действительно показывает наличие существенно значимой связи этих двух параметров во всем диапазоне длин волн (см. табл. 3). В видимой области коэффициент корреляции  $\rho_{\alpha R}$  составляет 0,44, а в районе  $\lambda = 2,20$  мкм он убывает до уровня 0,30 и остается на этом уровне (с небольшими флуктуациями) вплоть до  $\lambda = 11,1$  мкм. В целом спектральная структура коэффициента корреляции  $\rho_{\alpha R}$  подтверждает высказанное выше предположение об адекватном влиянии относительной влажности воздуха на аэрозоль прибрежной зоны.

На основе статистических характеристик массива экспериментальных данных, приведенных в табл. 3, была разработана эмпирическая однопараметрическая модель восстановления спектральной структуры коэффициентов аэрозольного ослабления в дымках прибрежного района. Учитывая достаточно высокий уровень линейной связи между коэффициентами аэрозольного ослабления в видимой и инфракрасной областях спектра, для разработки модели мы использовали уравнение среднеквадратической регрессии:

$$\alpha_\lambda = \bar{\alpha}_\lambda + \rho_{\alpha_\lambda \alpha_{0,55}} \cdot \frac{\sigma_{\alpha_\lambda}}{\sigma_{\alpha_{0,55}}} \cdot (\alpha_{0,55} - \bar{\alpha}_{0,55}), \quad (1)$$

где  $\alpha_{0,55}$  — коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм (входной параметр модели).

Уравнение (1) легко приводится к более простому виду

$$\alpha_\lambda = K_{0\lambda} + K_{1\lambda} \cdot \alpha_{0,55}, \quad (2)$$

где  $K_1 = \rho_{\alpha_\lambda, \alpha_{0,55}} \cdot \sigma_{\alpha_\lambda} / \sigma_{\alpha_{0,55}}$ , а  $K_0 = \bar{\alpha}_\lambda - K_1 \cdot \bar{\alpha}_{0,55}$  — эмпирические коэффициенты, значения которых для основных окон прозрачности приведены в табл. 4. Здесь же указана и среднеквадратическая ошибка восстановления  $\delta_{\alpha_\lambda}$ ,  $\text{км}^{-1}$ , рассчитываемая по формуле  $\delta_{\alpha_\lambda} = \sigma_{\alpha_\lambda} \cdot (1 - \rho_{\alpha_\lambda, \alpha_{0,55}}^2)^{1/2}$ .

В процессе разработки модели была предпринята попытка уменьшить погрешность восстановления коэффициентов  $\alpha_\lambda$  за счет введения в уравнение регрессии дополнительных входных параметров, в качестве которых использовались относительная влажность воздуха, температура воздуха и скорость ветра.

Таблица 4

Эмпирические коэффициенты к модели (2)

$\alpha$ , МКМ	$K_1$	$K_0$ , км <sup>-1</sup>	$\delta_{\alpha}$ , км <sup>-1</sup>
0,69	0,77	0,019	0,012
1,06	0,51	0,017	0,022
1,25	0,45	0,014	0,026
1,60	0,36	0,014	0,028
2,20	0,32	0,017	0,032
3,97	0,27	0,019	0,031
8,60	0,30	0,029	0,038
9,20	0,33	0,031	0,038
10,20	0,32	0,031	0,039
10,60	0,32	0,036	0,040
11,10	0,32	0,042	0,043

Расчеты показали, что введение дополнительных параметров уменьшает погрешность модели не более чем на 5%, что согласуется с выводами [12]. Этот неожиданный результат объясняется тем, что вариации коэффициентов  $\alpha_\lambda$ , обусловленные дополнительными параметрами, в значительной мере отражены и в вариациях основного входного параметра  $\alpha_{0,55}$ .

Для прикладных задач данную модель рекомендуется использовать только для теплого периода года, при видимостях от 5 до 40 км.

1. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. — Казань: Изд-во КГУ, 1986. — 157 с.
2. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Чавро А.И., Шукуров А.Х. — Изв. АН СССР. ФАО, 1977, т. 13, № 12, с. 1257.
3. Парамонова Н.Н., Броунштейн А.М., Казакова К.В., Немец О.А. — Тр. ГГО, 1984, № 472, с. 88.
4. Парамонова Н.Н., Броунштейн А.М., Привалов В.И. — Тр. ГГО, 1985, № 496, с. 84.
5. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. — ДАН СССР, 1982, т. 265, № 6, с. 1353.
6. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. — В кн.: Физика атмосферы и проблемы климата. — М.: Наука, 1980, с. 216.
7. Першин А.А., Пхалагов Ю.А. Некоторые аппаратно-методические особенности измерения спектральной прозрачности атмосферы на протяженных тоассах. Деп. ВИНТИ, 1975, № 3050-75.
8. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. — В кн.: IV Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Тез. докл., ч. I. Томск: ИОА СО АН СССР, 1981, с. 94.
9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 224 с.
10. Козлов В.С., Полькин В.В., Пхалагов Ю.А. — Радиация, облачность, аэрозоль в атмосфере. Материалы XII Совещания по актинометрии. — Иркутск, 1984, с. 80.
11. Георгиевский Ю.С., Пирогов С.М., Чавро А.И., Шукуров А.Х. — Изв. АН СССР. ФАО, 1978, т. 14, № 4, с. 405.
12. Nilsson B. — Acta univ. Upsal. Compr. Summ. Uppsala Diss. Fac. ScL, 1986, № 49, 33 p.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
4 января 1988 г.

Yu. A. Pkhlagov, V. N. Uzhegov. **Statistical Characteristics of Aerosol Attenuation of Optical Radiation in Coastal Hazes.**

The statistical characteristics of aerosol attenuation coefficients of the visible and IR radiation on long-term measurements of atmospheric transmittance in coastal hazes of the Black Sea are described. The empirical model for restituting a spectral structure of aerosol attenuation coefficients in the IR using the measured value  $\alpha_\lambda$  in the visible ( $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ ) is suggested.