

**М.В. Панченко, В.В. Польшкин, Ю.А. Пхалагов, Н.Н. Щелканов**

### **СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ОПТИЧЕСКИХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ АРИДНОЙ ЗОНЫ**

В условиях аридной зоны исследованы статистические связи между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4-11,5$  мкм, измеренных на протяженной трассе с данными локальных измерений ореольных индикатрис рассеяния  $\beta$  и функции распределения частиц по размерам  $f$ . Оценивается возможность восстановления в рамках малопараметрических моделей значений  $\alpha(\lambda)$  во всем спектральном диапазоне при использовании в качестве входных параметров результатов измерений в локальном объеме.

Знание коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  в видимой и ИК-области спектра необходимо для решения ряда научных и практических задач. В то же время непосредственное измерение  $\alpha(\lambda)$  в широком спектральном диапазоне даже для приземных условий не всегда осуществимо, поскольку требует использования протяженных трасс и применения весьма дорогостоящей и громоздкой аппаратуры. В этом случае для оценки спектральных коэффициентов ослабления, как правило, используются малопараметрические модели, входными параметрами которых являются оптические или микрофизические характеристики, измеряемые более доступным способом [1-3]. Эти модели по своей сути являются статистическими и базируются на ранее установленных связях  $\alpha(\lambda)$  с иными параметрами.

В том случае, когда в качестве входных параметров модели используются значения коэффициентов аэрозольного ослабления, измеренных базовым способом для одной или нескольких длин волн, проблема точности восстановления спектрального хода  $\alpha(\lambda)$  зависит от информативности (чувствительности) данного спектрального участка ко всему спектру размеров частиц, формирующих ослабляющее действие во всем необходимом спектральном диапазоне.

Применение иных входных параметров, например нефелометрических или микроструктурных данных, связано, как правило, с использованием измерений в гораздо меньших объемах воздуха по сравнению с базовым методом. Это обстоятельство порождает дополнительный источник погрешностей, связанных с разнородностью исследуемых объектов, с существенным различием их масштабов и различной информативностью измеряемых характеристик ко всему активному (с оптической точки зрения) диапазону размеров частиц.

Сложная зависимость изменчивости характеристик аэрозоля от геофизических, синоптических, метеорологических и иных факторов (источники, стоки и т.д.) не позволяет для создания такого рода малопараметрических моделей воспользоваться теоретическими расчетами, а требует постановки специальных экспериментов. Такие исследования проводились ранее для района Подмосковья [1,2], а также в условиях дымки морского прибрежного района [3].

В настоящей статье рассмотрены статистические связи между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4-11,5$  мкм, измеренными на протяженной трассе, и данными локальных измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля для условий аридной зоны. В качестве последних была выбрана ореольная часть индикатрисы рассеяния  $\beta(\theta)$  для длины волны  $\lambda = 0,6328$  мкм и  $\theta = 20^\circ \pm 10^\circ$ , а также функция распределения частиц по размерам в диапазоне радиусов  $a = 0,2 \div 5,0$  мкм.

Измерения оптических и микрофизических характеристик, сопровождаемые стандартными метеонаблюдениями, проводились в октябре 1986 года в Казахстане в условиях полупустынной местности. Характерной особенностью условий измерений была высокая прозрачность атмосферы. Метеорологическая дальность видимости  $S_m$  составляла в среднем 60 км.

Измерения спектральной прозрачности атмосферы проводились на приземной трассе протяженностью 4630 м с использованием аппаратного комплекса, описание которого дано в [4,5].

Для измерений ореольной части индикатрисы рассеяния использовался специально разработанный ореольный фотометр [6], работающий на трассе длиной 105 м. Сформированный с помощью коллиматора квазипараллельный лазерный пучок диаметром 50 мм проходил на высоте 2,5 м над поверхностью земли.

Функция распределения частиц аэрозоля по размерам измерялась аэрозольным счетчиком АЗ-5.

В связи со спецификой работы ореольного фотометра синхронные измерения всего комплекса перечисленных выше параметров проводились только в темное время суток (с 20<sup>00</sup> до 8<sup>00</sup>). Интервал между измерениями составлял 1 час 15 мин, осреднение измеряемых параметров проводилось за период 30 мин.

Статистической обработке были подвергнуты 44 спектра коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha_i$ , функция распределения частиц по размерам  $N(a)$ , ореольная часть индикатрисы рассеяния  $\beta(\theta)$  и метеопараметры: относительная влажность  $r$ , парциальное давление паров воды  $e$ , температура воздуха  $t$ , скорость ветра  $v$ . Для данного массива измерений были получены следующие средние значения, среднеквадратические отклонения (даны в скобках) метеопараметров:  $\bar{e} = 5,7 (1,0)$  Бм,  $\bar{t} = 2,5 (2,1)^\circ\text{C}$ ,  $\bar{r} = 77,3 (10)\%$ ,  $\bar{v} = 3,6 (1,6)\text{м/с}$ .

В табл. 1 приведены средние значения, среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации наблюдаемых оптических и микрофизических характеристик: концентрации аэрозольных частиц  $\bar{N}_i(a > a_i)$ , коэффициентов аэрозольного ослабления  $\bar{\alpha}(\lambda)$ , ореольной части индикатрисы рассеяния  $\bar{\beta}(\theta_i)$  для  $\lambda = 0,63$  мкм.

Таблица 1

Средние значения, коэффициенты вариаций и среднеквадратические отклонения измеряемых параметров

$i$	$a_i$ , мкм	$\bar{N}_i(a > a_i)$	$V_{N_i}$	$\sigma_{N_i}$	$\lambda_i$ , мкм	$\bar{\alpha}_i$	$V_{\alpha_i}$	$\sigma_{\alpha_i}$	$\theta_i$	$\bar{\beta}_i(\theta_i)$	$V_{\beta_i}$	$\sigma_{\beta_i}$
1	0,2	4846	0,59	2840	0,44	70	0,76	53	20'	1166	1,35	1576
2	0,25	1946	0,68	1324	0,55	61	0,70	43	30'	888	1,30	1150
3	0,3	958	0,78	749	0,87	52	0,62	32	40'	678	1,17	793
4	0,35	602	0,72	433	1,06	52	0,60	31	50'	560	1,05	588
5	0,4	412	0,75	308	1,60	55	0,51	28	1°	477	0,98	469
6	0,45	299	0,74	222	3,97	54	0,54	29	1,5°	344	0,89	305
7	0,5	230	0,77	177	9,20	68	0,56	38	2°	275	0,83	228
8	0,75	136	0,74	101	10,6	65	0,52	34	3°	185	0,79	146
9	1,0	85	0,72	61	11,5	69	0,57	39	4°	153	0,70	107
10	2	10	0,90	9					5°	110	0,72	79
11	3,5	1	1,00	1					10°	38	0,39	15

Из представленных в табл. 1 данных видим, что с увеличением радиуса частиц  $a_i$  и уменьшением угла рассеяния  $\theta_i$  наблюдается рост коэффициентов вариации  $V_N$  и  $V_\beta$ . Изменения  $V_\alpha$  гораздо меньше и имеют практически нейтральный ход.

Понятно, что вариации измеряемых параметров определяются изменчивостью исследуемой среды и погрешностями измерительных трактов используемой аппаратуры. В нашем случае относительная аппаратная погрешность измерений для всех трех установок примерно одинакова и составляет  $\delta \sim 5-7\%$ . Основная же доля наблюдаемой дисперсии обусловлена изменчивостью аэрозольной среды.

В свою очередь вариации аэрозольных характеристик связаны со следующими основными процессами: изменением общей концентрации аэрозольных частиц; трансформацией функции распределения частиц по размерам (эти два процесса определяются воздействием внешних геофизических, синоптических и метеорологических факторов); естественными флуктуациями числа частиц  $N_i$  в рабочих объемах измерительных устройств. Очевидно, что изменения общего содержания частиц в атмосфере не приводят к нарушению автокорреляционных связей  $\alpha(\lambda_k, \lambda_j)$ ,  $\beta(\theta_k, \theta_j)$  и  $N(a_k, a_j)$ .

Для того чтобы оценить характер влияния изменений функции распределения частиц по размерам, обратимся к табл. 2 и 3, где приводятся нормированные автокорреляционные матрицы этих параметров.

Таблица 2

Нормированные автокорреляционные матрицы ореольной индикатрисы рассеяния и коэффициентов аэрозольного ослабления (уровень значимости корреляции 0,31)

$i$	$\rho(\beta_{\theta_i}, \beta_{\theta_k}) \cdot 10^2$											$\theta$
	20'	30'	40'	50'	1°	1,5°	2°	3°	4°	5°	10°	
0,44	100	98	96	91	88	78	74	69	65	62	42	20'
0,55	99	100	97	95	94	86	84	79	75	73	54	30'
0,87	96	96	100	98	96	88	83	77	72	69	50	40'
1,06	92	92	95	100	99	95	91	86	82	79	62	50'
1,60	87	85	91	97	100	97	94	89	86	83	67	1°
3,97	82	80	86	93	97	100	99	96	94	91	76	1,5°
9,20	78	77	82	92	94	94	100	99	97	95	82	2°
10,6	81	80	85	93	96	95	99	100	99	98	87	3°
11,5	78	77	82	91	93	91	99	98	100	99	89	4°
$\lambda$ , мкм	0,44	0,55	0,87	1,06	1,60	3,97	9,20	10,6	11,5	100	91	5°
	$\rho(\alpha_{\lambda_i}, \alpha_{\lambda_k}) \cdot 10^2$										100	10°

Наблюдаемые высокие значения коэффициентов автокорреляции (уровень значимой корреляции равен 0,31) для коэффициентов аэрозольного ослабления ( $\rho \geq 0,77$ ), ореольной индикатрисы рассеяния ( $\rho \geq 0,42$ ) и функции распределения частиц по размерам ( $\rho \geq 0,39$ ), по-видимому, могут свидетельствовать об определенной взаимосвязи процессов, обуславливающих изменчивость мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций частиц для обсуждаемого массива данных.

Таблица 3

Нормированная автокорреляционная матрица концентрации аэрозольных частиц

$i$	$\Delta\alpha_p$ , мкм	$\rho_{N_k N_i}$				
		$k=1$	2	3	4	5
1	0,2±0,35	100	86	74	73	39
2	0,35±0,5		100	91	90	45
3	0,5±1			100	93	54
4	1±3,5				100	63
5	>3,5					100

Наличие высокой автокорреляционной связи для  $\alpha(\lambda)$  (табл. 2) позволяет в рамках уравнения линейной регрессии восстанавливать значения  $\alpha(\lambda)$  во всем спектральном диапазоне, используя в качестве входного параметра значения  $\alpha(\lambda)$  для одной  $\lambda$ . В частности, в рамках такого однопараметрического подхода значение коэффициентов аэрозольного ослабления ( $\alpha(\lambda = 10,6$  мкм) восстанавливается при использовании входного параметра  $\alpha(\lambda = 0,55$  мкм) с относительной погрешностью  $\delta = 31\%$ . Использование в качестве входного параметра измерений в видимой области спектра наиболее предпочтительно с точки зрения аппаратурной реализации. Такая однопараметрическая модель позволяет хорошо учитывать вариации мелкодисперсной фракции аэрозоля, а вариации крупнодисперсных частиц здесь учитываются опосредованно через корреляционные связи. Исходя из этого, видно, что для улучшения точности восстановления  $\alpha(\lambda)$  в инфракрасной области спектра нужно использовать дополнительный параметр, учитывающий вариации крупных частиц.

Наилучшую точность восстановления можно достичь, если в качестве второго входного параметра использовать значение  $\alpha(\lambda)$  в ИК-диапазоне длин волн (см. коэффициенты корреляции в табл. 2). В то же время, учитывая аппаратурные сложности измерения коэффициентов ослабления в ИК-области спектра, желательно подобрать такого рода входной параметр среди характеристик, измеряемых локальными методами. Для подбора второго параметра были определены условные коэффициенты взаимной корреляции между  $\alpha(\lambda_i)$  и  $N_i$  и между  $\alpha(\lambda_i)$  и  $\beta(\theta)$  соответственно, при условии, что вариации  $\alpha(\lambda = 0,55$  мкм) равны нулю. Результаты расчета приведены на рис. 1 и 2.

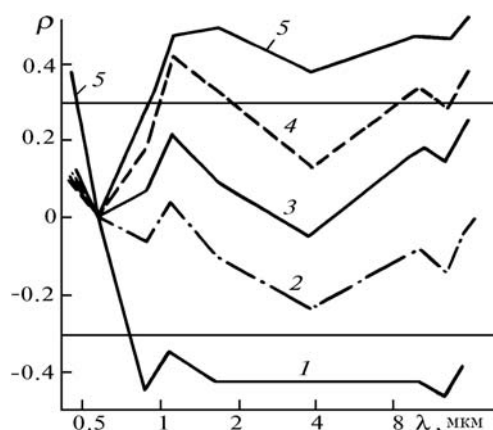


Рис. 1. Спектральный ход коэффициентов условной корреляции  $\rho(N_i(\Delta a), \alpha_\lambda/\alpha_{0,55})$ : кривая 1 –  $\Delta a = 0,2 \div 0,35$  мкм; 2 –  $0,35 \div 0,5$ ; 3 –  $0,5 \div 1$ ; 4 –  $1 \div 3,5$ ; 5 –  $a > 3,5$  мкм

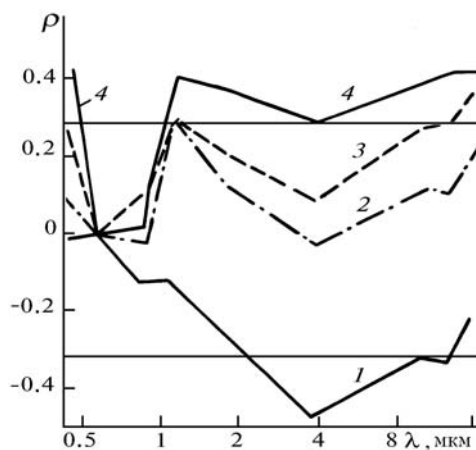


Рис. 2. Спектральный ход коэффициентов условной корреляции  $\rho(\beta(\theta), \alpha_\lambda/\alpha_{0,55})$ : кривая 1 –  $\theta = 10^\circ$ ; 2 –  $5^\circ$ ; 3 –  $1^\circ$ ; 4 –  $20^\circ$

Из рисунков следует, что в качестве второго параметра могут быть использованы значения  $N_i$  для крупных частиц (например, с  $a > 3,5$  мкм) и  $\beta(\theta)$  для  $\theta = 20^\circ$ . Относительная среднеквадратическая погрешность восстановления  $\alpha(\lambda = 10,6$  мкм) при использовании второго параметра  $\beta(\theta = 20^\circ)$  составила 28%, а для  $N(a > 3,5$  мкм) – 27%. Формулы для расчета относительной среднеквадратической ошибки восстановления брались из [7]. Из рисунков видно также, что введение дополнительной информации, полученной в локальном объеме, позволяет уменьшить ошибку восстановления  $\alpha(\lambda)$  в длинноволновой области спектра на 3–4%.

Основным препятствием на пути улучшения восстановления  $\alpha(\lambda)$  при использовании в качестве входных параметров характеристик, определяемых в локальных объемах, являются вариации измеряемых параметров за счет флуктуаций аэрозольной среды, которые тесно связаны с величиной и особенностями формирования рабочего объема.

В нашем эксперименте для трассовых измерений  $\alpha(\lambda)$  рабочий объем составлял около  $4000$  м<sup>3</sup>, максимальный объем при измерениях методом пространственного сканирования ореольной индикатрисы  $\beta(\theta)$  был равен  $0,05$  м<sup>3</sup> (для  $\theta = 20^\circ$ ), а минимальный  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> ( $\theta = 10^\circ$ ). Величина объема воздуха, прокачиваемого через фотоэлектрический счетчик АЗ-5, составляла  $10^{-3}$  м<sup>3</sup> для мелкодисперсных частиц и  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> – для крупнодисперсных.

Флуктуации концентрации аэрозольных частиц различного размера будут по-разному влиять на вариации измеряемых параметров в зависимости от величины рассеивающего объема, а в случае ореольных индикатрис и от относительного вклада частиц данного размера в формирование общего сигнала рассеяния в заданном направлении. Так, например, из анализа угловой зависимости  $\beta(\theta)$  и вида функции распределения частиц по размерам  $N(a)$  следует, что частицы с  $a \geq 20$  мкм (концентрация  $\sim 0,1$  л<sup>-1</sup>) дают основной вклад в вариации сигналов  $\beta(\theta)$  для углов рассеяния  $\theta < 1^\circ$ . Для оценок энергетике рассеянного излучения в определенных направлениях можно воспользоваться следующими соображениями: основная энергия излучения, рассеянного вперед, сосредоточена в области до первого дифракционного минимума индикатрисы, угловое положение которого приближенно может быть оценено как  $\theta \sim 180^\circ/\rho$ , где  $\rho = 2\pi a/\lambda$ . В то же время для  $\alpha(\lambda)$  вариации таких частиц дают вклад в дисперсию  $\sigma_\alpha$  не более 1% для всего спектрального диапазона измерений. Коэффициент вариаций аэрозольных частиц  $V_N$  по измерениям фотоэлектрическим счетчиком увеличивается с ростом размера  $a$ , и достигает 100% для  $a > 3,5$  мкм.

Спектральный ход коэффициентов взаимной корреляции на рис. 3 показывает, что с увеличением размера частиц и уменьшением угла рассеяния наблюдается тенденция к относительному увеличению коэффициентов корреляции в длинноволновой области по сравнению с коротковолновой. Различия в величине рабочих объемов экспериментальных установок, при-

водящие к разному влиянию крупных частиц на вариации измеряемых параметров, как было отмечено выше, вызывают падение абсолютных значений коэффициентов корреляции в длинноволновой области для крупных частиц с  $a > 3,5$  мкм и  $\theta \sim 20'$ .

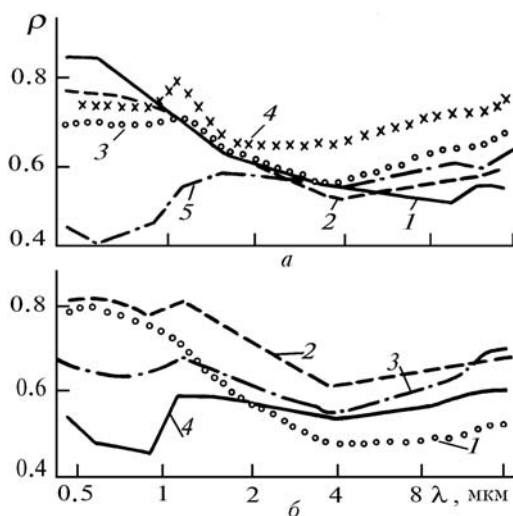


Рис. 3. Спектральный ход коэффициентов взаимной корреляции: *а* – между концентрацией аэрозольных частиц различных фракций  $\Delta a$  и спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления  $\alpha_\lambda$ : 1 –  $\Delta a = 0,2 \div 0,35$  мкм; 2 –  $0,35 \div 0,5$ ; 3 –  $0,5 \div 1$ ; 4 –  $1 \div 3,5$ ; 5 –  $a > 3,5$  мкм; *б* – между ореольной частью индикатрисы рассеяния  $\beta(\lambda = 0,6328$  мкм,  $\theta$ ) и спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления  $\alpha_\lambda$ : 1 –  $\theta = 10^\circ$ ; 2 –  $5^\circ$ ; 3 –  $1^\circ$ ; 4 –  $20'$

С учетом сказанного попробуем оценить возможности модели восстановления коэффициентов аэрозольного ослабления, представляющей наибольший практический интерес, если при этом в качестве входных параметров будем использовать только данные локальных измерений.

В рамках однопараметрического представления коэффициент аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda = 10,6$  мкм) восстанавливается по  $N(a > 3,5$  мкм) с относительной средней погрешностью 36%, а по  $\beta(\theta = 20^\circ)$  с погрешностью 42%. Очевидно, для двухпараметрической методики при восстановлении  $\alpha(\lambda)$  лучше выбрать сочетание пар из набора:  $N(a > 0,2$  мкм),  $N(a > 3,5$  мкм),  $\beta(\theta = 20^\circ)$ ,  $\beta(\theta = 5^\circ)$ . Для восстановления  $\alpha(\lambda)$  в видимой и ближней ИК-области спектра можно использовать параметры  $\beta(\theta > 2^\circ)$  и  $N(a > 0,2$  мкм) ( $\delta \sim 32\%$ ).

Наименьшую относительную погрешность восстановления, в среднем составляющую  $\delta \sim 35\%$ , для  $\alpha(\lambda = 10,6$  мкм) дает пара  $\beta(\theta = 5^\circ)$  и  $N(a > 3,5$  мкм). Эта же пара обеспечивает удовлетворительное восстановление  $\alpha(\lambda)$  для  $\lambda = 0,55; 1,06; 3,9$  мкм ( $\delta = 36\%$ ). Из рис. 3, *а* (кривая 4) и рис. 3, *б* (кривая 2) видно, что именно этим параметрам соответствуют наибольшие значения коэффициентов корреляции с  $\alpha(\lambda)$ .

Пути повышения качества восстановления  $\alpha(\lambda)$  видятся в увеличении рабочего объема установок и разумного (не превышающего собственные ритмы геофизических процессов) увеличения массива осреднения данных в локальных объемах.

Таким образом, проведенный анализ статистических связей оптических и микрофизических характеристик аэрозоля аридной зоны показал, что существует реальная возможность в рамках малопараметрических моделей восстанавливать значения коэффициентов аэрозольного ослабления в широком диапазоне длин волн 0,4 – 12 мкм. В этих моделях в качестве входных параметров можно использовать не только данные измерений  $\alpha(\lambda)$  на протяженных трассах в видимой области спектра, но и результаты измерений в локальных объемах ореольной индикатрисы рассеяния и концентрации аэрозольных частиц.

1. Георгиевский Ю.С., Пирогов С.М., Чавро А.И., Шукуров А.Х. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 4. С. 405–411.
2. Чавро А.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 21. N 3. С. 270–275.

3. Баранник Л.П., Полькин В.В., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. // Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Ч. 1. Томск, 1986. С. 83–87.
4. Волков А.Н., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. // VII Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск, 1983. С. 259–260.
5. Кабанов М.В., Першин А.А., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. // Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. Томск, 1975. С. 189–207.
6. Коханенко Г.П., Крутиков В.А., Панченко М.В., Полькин В.В. // Изв. вузов. Физика. Деп. 17 марта, 1986. 7 с.
7. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
16 марта 1993 г.

M.V. Panchenko, V.V. Pol'kin, Yu.A. Pkhalagov, N.N. Shchelkanov. **Statistical Relations between the Optical and Microphysical Characteristics of Aerosol in Arid Zones.**

Statistical relations between the spectral extinction coefficient  $\alpha(\lambda)$  ( $\lambda = 0,4\text{--}11,5 \mu\text{m}$ ) of aerosol in an arid zone measured along a horizontal path and aureol portions of scattering phase function  $\beta$  and size-distribution function  $f(r)$  are studied. A possibility of reconstructing  $\alpha(\lambda)$  in the whole spectral region using a few parameters models with the input parameters obtained from *in situ* measurements.