

Р.Ф. Рахимов, М.В. Панченко

## ОБ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УГЛОВЫХ ФУНКЦИЙ АЭРОЗОЛЬНОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 3.12.98 г.

Принята к печати 15.12.98 г.

На основе модельных оценок анализируются роль случайных и регулярных воздействий геофизических факторов в формировании эмпирически установленной однопараметрической модели атмосферной изменчивости индикатрисы светорассеяния приземной дымки и область применения данной модели. Показано, что анализируемая модель взаимного изменения характеристик аэрозольного светорассеяния совместима с реально наблюдаемым многообразием дисперсного состава приземной дымки, при условии существенной изменчивости оптических постоянных и наличии характерных динамических изменений спектра размеров частиц с относительной влажностью. Применение однопараметрической модели более оправдано для атмосферных ситуаций, где наблюдается значительная динамика относительной влажности.

### 1. Введение

Аэрозольная компонента в атмосфере практически постоянно находится под воздействием сложного комплекса геофизических процессов. Поскольку момент и длительность этих воздействий – события достаточно случайные, априорная оценка параметров светорассеяния на основе методов динамического моделирования аэрозольных процессов невозможна без привлечения конкретных оперативных данных. В связи с этим разработка данной проблемы все более смещается к изучению вопроса о статистической значимости различных геофизических факторов в изменении оптических свойств атмосферного аэрозоля. Изучение устойчивых закономерностей взаимного изменения прогнозируемых величин с определенными геофизическими признаками позволяет вывести за рамки теоретического анализа ряд довольно сложных для динамического моделирования геофизических процессов, повысить эффективность прогноза, используя эти признаки в качестве предикторов изменения оптических свойств дисперсной компоненты атмосферы.

Вопрос о физических предпосылках однопараметрического представления атмосферной изменчивости значений угловых функций аэрозольного светорассеяния в литературе обсуждался неоднократно, в том числе и в [1] с привлечением модельных оценок. Но ранее это было проведено на небольшом объеме численных оценок, что было обусловлено ограниченными возможностями ЭВМ тех лет. В настоящей работе предпринята попытка анализа взаимодействия регулярных и случайных факторов изменчивости оптических свойств атмосферной дымки.

### 2. Статистическое описание коэффициентов направленного рассеяния

Согласно общей схеме построения эмпирических моделей [2] любая  $k$ -я реализация измеренной индикатрисы рассеяния  $g(\theta_k)$  или  $g_{\perp}(\theta_k)$ ,  $g_{\parallel}(\theta_k)$  может быть представлена как случайный  $n$ -мерный вектор ( $k = 1, \dots, n$ ). В этом случае совокупность реализаций из  $N$  таких случайных векторов образует статистический ансамбль, свойства которого

определяются через средние значения  $\overline{g(\theta_k)}$ , дисперсию  $D_g(\theta_k)$ , среднее квадратическое отклонение  $\delta_g(\theta_k) = \sqrt{D_g(\theta_k)}$  и автокорреляционную матрицу  $B_{gg}(\theta_k, \theta_l)$ , а любой случайный вектор  $g_i(\theta_k)$  из этого ансамбля можно аппроксимировать с помощью некоторого набора эмпирических ортогональных функций.

Первой реализацией подобной схемы исследования статистических свойств угловых зависимостей компонент матрицы рассеяния была модель, разработанная в [3] по результатам оптических измерений в континентальных условиях. В частности, было показано, что логарифм значений нормированной индикатрисы рассеяния с хорошим приближением может быть представлен разложением по первому собственному вектору или регрессионной зависимостью вида

$$\ln[g(\theta, \lambda)] = k(\theta, \lambda) \ln \beta_{\sigma}(\lambda) + \ln[c(\theta, \lambda)], \quad (1)$$

где  $\beta_{\sigma}$  – коэффициент аэрозольного светорассеяния;  $k(\theta, \lambda)$  и  $c(\theta, \lambda)$  – параметры модели.

Сопоставление результатов цикла измерений, выполненных на побережье Черного моря [4], с данным, полученными на континенте [3], показало (табл. 1), что, несмотря на очевидную специфику формирования атмосферной дымки в обоих регионах, для них в среднем характерна сходная динамика трансформации угловых функций светорассеяния.

Очевидно, что статистический разброс экспериментальных точек в закономерности взаимного изменения интегральных и угловых характеристик светорассеяния является следствием некоррелированности моментов активизации микропроцессов, определяющих внутреннее развитие дисперсной системы и нерегулярных, но устойчиво повторяющихся воздействий внешних геофизических факторов, изменяющих мезомасштабную структуру аэрозольных полей. В связи с этим воспроизводимость закономерности в двух разнородных регионах формирования атмосферной дымки – явный признак сходства внешних воздействий, например устойчивых суточных циклов колебаний относительной влажности.

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов  $k(\theta)$  для разных географических пунктов

$\theta^\circ$	Крым, 1974–1977	Томск, 1975	Звенигород, 1971	Звенигород, 1972
5	0,22	-0,08	–	(3°)0,18
15	0,33	-0,21	0,34	0,25
20	0,31	0,18	0,33	0,18
30	0,16	0,12	0,22	0,06
50	-0,18	-0,05	-0,07	-0,12
70	-0,35	-0,18	-0,28	-0,26
90	-0,44	-0,26	-0,42	-0,36
110	-0,48	-0,35	-0,47	-0,44
120	-0,51	-0,38	-0,50	-0,47
140	-0,51	–	-0,48	-0,45
150	-0,52	-0,39	-0,46	-0,41
160	-0,52	-0,42	-0,46	-0,40
165	-0,52	-0,39	-0,47	-0,44

Из численного анализа информативности угловых характеристик [5, 6] следует, что величина коэффициента направленного светорассеяния, для длины волны  $\lambda = 0,55$  мкм, в интервале углов  $\theta = 10\text{--}170^\circ$  в основном определяется вкладом частиц, радиус которых сравним или меньше длины волны падающего излучения. Поэтому обсуждаемая однопараметрическая модель отражает в первую очередь характерные изменения, происходящие с субмикронными частицами, которые определяют мутность атмосферы в видимом диапазоне длин волн. Данный интервал размеров – это область межфракционного взаимодействия аэрозолей первичного и вторичного формирования. Следовательно, при экстраполяции модели на другие длины волн необходимо проявлять определенную осторожность, поскольку в зависимости от длины волны будет изменяться интервал размеров частиц, определяющих угловую диаграмму светорассеяния.

Кроме того, есть основание ожидать неоднозначную регионально зависимую динамику для лидарного отношения, значения которого зависят как от интервала вариаций относительной влажности, так и от локальных особенностей дисперсного и химического состава грубодисперсных аэрозолей.

### 3. Параметрическое описание микроструктурных изменений приземной атмосферной дымки

Накопленные эмпирические данные о дисперсном составе аэрозольной дымки, полученные в основном для приземного слоя, достаточно разноречивы, и вопрос их обобщения на другие высоты и климатические зоны представляет собой весьма сложную проблему. Поэтому при численной имитации статистического разнообразия состояний атмосферной дымки достаточно непростой для реализации является задача формирования адекватного ансамбля случайных реализаций спектра размеров частиц. С одной стороны, необходимо стремиться к реальному многообразию форм, а с другой – не выходить за рамки качественного определения дисперсной системы как атмосферной дымки.

На рис. 1 приведена выборка из нескольких спектров распределения, измеренных на достаточно широком интервале шкалы размеров. Здесь, в частности, представлены конкретные реализации спектров, полученных в [7] (обозначенных символами  $\nabla, \nabla$ ) и [8] (символами  $\bullet, \circ$ ), спектров (сплошные линии без обозначений), которые рекомен-

дованы экспертной группой [9] в качестве модельных для некоторых типовых аэрозольных образований, а также из результатов настоящих модельных оценок.

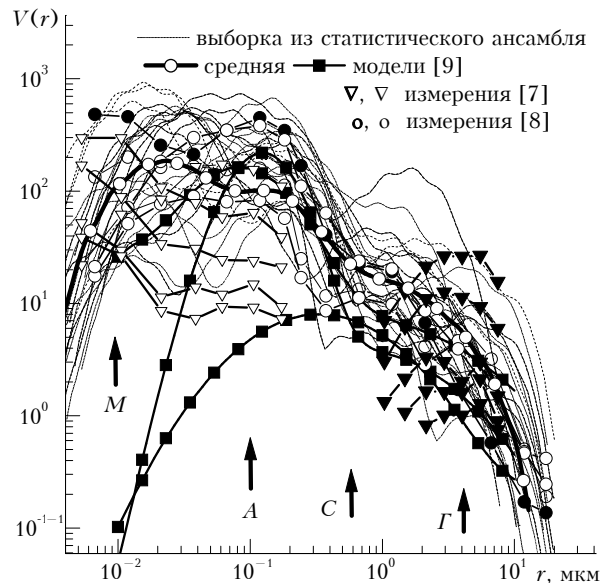


Рис. 1. Случайная выборка распределений частиц атмосферной дымки по размерам из генеральной совокупности (значения параметров которых лежат в интервалах, указанных в табл. 2), в сопоставлении с данными измерений [7, 8] и модельными аналогами [9] для некоторых типовых образований

Как видно из рис. 1, вариации количественного содержания частиц атмосферной дымки на различных интервалах шкалы размеров не только значительны, но и нередко слабо связаны друг с другом. Для спектров с высоким содержанием частиц аккумулятивной фракции в ряде случаев наблюдаются относительно низкие концентрации частиц грубодисперсной фракции и наоборот, что свидетельствует об относительной самостоятельности процессов, определяющих механизм формирования дисперсного состава дымки на этих интервалах. Поэтому в последующих модельных оценках для параметризации микроструктурных изменений применялась пофракционная методика. В частности, многообразие возможных состояний дисперсного состава атмосферной дымки воспроизводилось на основе моделирования случайных и динамических изменений параметров полимодального распределения.

На первом этапе предполагался спектр размеров частиц, состоящий из четырех фракций (местоположение фракций на рис. 1 указано стрелками и определено начальными буквами: микродисперсная, аккумулятивная, среднедисперсная и грубодисперсная) [5, 6]:

$$f(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{3\nu(r)}{4\pi r^3} = A^{(\nu)} r^{-\nu} \sum_{i=1}^k M_i^{(\nu)} \exp \{-b_i [\ln(r/r_i^{(\nu)})]^2\}, \quad (2)$$

где  $dN$  – счетная концентрация аэрозольных частиц в единице объема в диапазоне радиусов от  $r$  до  $r + dr$ ;  $f(r)$  – функция плотности распределения частиц по размерам;  $A_i^{(\nu)}, M_i^{(\nu)}, b_i, r_i^{(\nu)}$  – параметры мод распределения.

Для того чтобы не выходить за рамки качественного определения дисперсной системы как атмосферной дымки, ансамбль случайных реализаций спектра размеров формировался методом случайной выборки значений параметров

модели (2) при  $\nu = 3$  из интервалов вариаций, указанных в табл. 2. Здесь в соответствии с качественным определением фракционных элементов представлены средние, минималь-

ные и максимальные значения интервалов статистических вариаций следующих величин:  $r_i^{(\nu)}$ ,  $b_i$  и  $F_i^{(\nu)} = A_i^{(\nu)} M_i^{(\nu)}$ .

Т а б л и ц а 2

Значения параметров функции распределения частиц по размерам (2)

Параметры моды распределения (2)	Значение			Распределение (тип)
	Среднее	Минимальное	Максимальное	
Микродисперсная фракция (МФ)				
$r_1$ , мкм	0,015	0,003	0,026	равномерное
$b_1$	1,64	1,29	2,01	«
$F_1$	62,0	17,3	227,3	нормальное
Аккумулятивная фракция (АФ)				
$r_2$ , мкм	0,090	0,027	0,182	равномерное
$b_2$	1,24	1,08	1,430	«
$F_2$	50,0	12,07	223,3	нормальное
Среднедисперсная фракция (СФ)				
$r_3$ , мкм	0,490	0,266	1,2	равномерное
$b_3$	1,43	1,15	1,77	«
$F_3$	2,6	0,5	14,0	нормальное
Грубодисперсная фракция (ГФ)				
$r_4$ , мкм	3,9	1,2	6,10	равномерное
$b_4$	1,84	1,21	1,99	«
$F_4$	0,54	0,04	5,43	нормальное

Далее, на втором этапе, для обеспечения качественного разнообразия возможных реализаций спектров и включения в статистический ансамбль спектров с тонкой и нерегулярной структурой каждая случайная реализация фракционного спектра (2) по определенному алгоритму заменялась оптически эквивалентной (в пределах 5–10% различий) суперпозицией от 7 до 20 (в зависимости от взаимного расположения ранее выделенных фракций) логарифмически нормальных мод.

Исходная равномерно распределенная по логарифмической шкале размеров статичная сетка логарифмически нормальных мод имеет параметры  $b_k = 16$ ,  $F_k = 1$ ,  $r_{mk} = r^{(b)} (r^{(e)}/r^{(b)})^{k/28}$ , где  $k = 0, \dots, 28$ ; при  $\nu = 3$  здесь и далее;  $r^{(b)}$ ,  $r^{(e)}$  – соответственно значения модального радиуса начального и конечного элементов сетки.

В качестве регулярного (многократно и устойчиво повторяющегося) фактора трансформации микроструктуры атмосферной дымки рассмотрены суточные вариации относительной влажности.

Следует признать, что вопрос параметризации микроструктурных изменений атмосферной дымки с ростом относительной влажности имеет достаточно обширную библиографию исследований. В частности, системные исследования микроструктурных изменений [10] привели к заключению, что частицы атмосферной дымки реагируют на изменение относительной влажности, в среднем, как дисперсная система частиц, содержащая и растворимые, и нерастворимые в воде ингредиенты.

Теоретические оценки равновесного размера аэрозольной частицы в увлажненной атмосфере являются логическим развитием модельной концепции смешанных ядер Винклера–Юнге–Хенеля, где в большинстве моделей используется известное выражение для парциального

давления водяного пара над частично растворимой сферической частицей [11]:

$$e_r = e_0(T) \exp \left[ \frac{2\sigma_p}{\rho R T r} \right] \left( 1 - \frac{A m_s}{r - r_T} \right), \quad (3)$$

где  $e_r$  и  $e_0(T)$  – соответственно значения парциального давления водяного пара над сферической частицей радиуса  $r$  и плоской поверхностью при температуре  $T$ ;  $\sigma_p$  и  $\rho$  – коэффициенты поверхностного натяжения и плотности раствора;  $m_s$  – масса растворимой части;  $r_T$  – эффективный радиус нерастворимой частицы. Параметр  $A$  характеризует понижение давления вследствие диссоциации, гидратации и других эффектов растворения. В случае термодинамического равновесия фаз отношение  $e_r/e_0 = q$  соответствует относительной влажности среды.

Однако при конкретном использовании данного подхода для прогноза микроструктурных реакций атмосферной дымки на вариации относительной влажности возникает проблема неоднозначного априорного выбора значений  $A$ ,  $m_s$ ,  $r_T$  для различных фракций, определяющих физико-химическую индивидуальность полидисперсной смеси. Эта проблема послужила причиной развития множества в принципе родственных теоретических моделей [10–16], которые могут быть обобщены соотношением

$$r = U r_0^\delta, \quad (4)$$

где  $r$  и  $r_0$  – радиус влажной и сухой частиц;  $U$  и  $\delta$  – функции относительной влажности  $q$ , конкретные значения которых зависят от композиционного состава частиц.

В табл. 3 приведено несколько примеров практикуемых в модельных оценках функциональных зависимостей для  $U$  и  $\delta$ .

Таблица 3

Автор	Соотношения для $U$ и $\delta$	Формула
Г. Хенел [10]	$U = \left\{ 1 + \frac{\rho_d}{\rho_w} \mu(q) \frac{q}{1-q} \right\}^{1/3}, \delta = 1$	(5)
А.П. Пришивалко [12]	$U = \left\{ 1 - G + \frac{\beta}{1-q} \right\}^{1/3}, \delta = 1$	(6)
Кастен [13]	$U = (1-q)^{-\gamma}, \delta = 1$	(7)
Уэллс [14]	$U = \{1 - C_1 \ln(1-q)\}, \delta = 1$	(8)
Туоми [15]	$\ln \delta = \frac{\alpha q}{(\zeta - q)}; \ln U = \frac{\xi q}{(\phi - q)}$	(9)

*Примечание.*  $\rho_d$  и  $\rho_w$  – соответственно плотность сухого остатка и воды;  $\mu(q)$ ,  $G$ ,  $C_1$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\zeta$ ,  $\xi$ ,  $\phi$  – конкретные параметры, которые варьируются в зависимости от относительной доли растворимого вещества и водной активности соединений, входящих в состав аэрозольных частиц.

Относительная влажность является регулирующим фактором не только гетерогенных конденсационных процессов, но и всего комплекса вторичных процессов, определяющих стадию внутриатмосферного синтеза аэрозольной фазы, в частности гетеромолекулярных процессов [4, 16]. В свою очередь, механизм коагуляционного объединения аэрозольных частиц активизирует процесс конденсации атмосферной влаги в связи с возникновением микропор при слипании двух или нескольких коагулянтов. Поэтому неоднозначная реакция аэрозольных образований на изменение относительной влажности атмосферы, разнообразие их возможных исходных состояний предопределяют необходимость и логичность пофракционной имитации процесса.

Поскольку процесс адаптации аэрозольной компоненты к колебаниям относительной влажности является скоротечным и сопутствующим другим процессам, деформации спектра размеров имитировались с учетом обобщенных данных прямых микроразмерных измерений [17], введением коррекции на изменение значений интегральных признаков дисперсной структуры  $S_i(q)$  и  $V_i(q)$  для каждой фракции атмосферной дымки отдельно.

Другим важным фактором, регулирующим статистическое разнообразие оптических свойств атмосферной дымки, является комплексный показатель преломления. Изменение показателя преломления аэрозольного вещества от одной реализации химического состава дымки к другой в численных оценках также моделировалось пофракционно, с характерными интервалами вариаций, обусловленными как региональной спецификой формирования химического состава фракций дымки, так и возможными вариациями относительной влажности [10].

Первые попытки учета вариаций  $m = n - i$  в зависимости от относительной влажности были предприняты в работах Вольца [18]. Значительное внимание этому вопросу было уделено в исследованиях Хенела [13]. Применяя правило Дейла–Гладстоуна, определяющее показатель преломления материалов со слабым поглощением и функциональную зависимость (4) для оценки процентного содержания воды, Хенел [10] в своих модельных оценках предложил следующее соотношение:

$$m = m_w + (m_d - m_w) \left\{ 1 + \frac{\rho_0}{\rho_w} m(q) \frac{1}{1-q} \right\}, \quad (10)$$

где  $m_d$  и  $m_w$  – значения  $m$  сухого остатка частицы и воды соответственно.

Однако, на наш взгляд, более обоснованным подходом к решению обсуждаемой проблемы представляется метод модельной оценки спектральной зависимости  $m$ , основанный на априорном анализе спектров молярных коэффициентов поглощения  $\kappa(\lambda)$  различных составляющих аэрозольного вещества. Метод позволяет более строго (особенно вблизи полос поглощения аэрозольного вещества) расчетным путем конструировать синтетическую зависимость  $\kappa(\lambda)$ , исходя из конкретного химического состава, в том числе и с учетом возможных колебаний уровня влажности в дисперсной фазе. Зная  $\kappa(\lambda)$  в широком спектральном интервале, спектральную зависимость действительной части  $n(\lambda)$  обычно рассчитывают, используя классические дисперсионные соотношения Крамерса–Кронига [19].

Различие в химическом составе первичных и вторичных аэрозолей обуславливает неоднозначность не только гигроскопических свойств, но и оптических постоянных. В настоящих модельных расчетах оптические постоянные частиц аккумулятивной и грубодисперсной фракций определялись раздельно в соответствии с первой и второй версиями синтетической модели комплексного показателя преломления [20], разработанными с учетом химического состава континентальной дымки. Кроме того, для определения оптических постоянных частиц с серноокислотной доминантой с учетом их вариаций, обусловленных разным содержанием воды, в их составе были использованы также данные [21].

#### 4. Обсуждение результатов модельных оценок

В качестве первого шага были рассмотрены данные численного эксперимента, ансамбль состояний которого формировался в результате равномерного заполнения указанных в табл. 2 интервалов изменения микроструктурных параметров. Как и следовало ожидать, в этом случае результаты расчетов показали, что для большинства углов рассеяния на корреляционной диаграмме между нормированными значениями индикатрисы рассеяния и объемного коэффициента рассеяния проявляется лишь размытое облако точек (рис. 2).

Данное статистическое множество реализаций было сформировано исходя из гипотезы о достаточно широких вариациях параметров распределения (1). Оценки показали, что при столь нейтральных предположениях относительно возможных вариаций дисперсного состава дымки о какой-либо устойчивой закономерности взаимной динамики коэффициента рассеяния и нормированных значений индикатрисы рассеяния можно говорить лишь условно, например в интервале углов 5–10 и 160–180°. Для других углов рассеяния какую-либо однозначную тенденцию взаимного изменения указать достаточно трудно, поскольку  $k(\theta)$  для этих углов близко к нулю.

Тем не менее попытка аппроксимировать слабо коррелированное множество точек зависимостью (2) обнаружила довольно близкую с эмпирической моделью аналогичную угловой зависимости для коэффициента  $k(\theta)$  (кривые 1 и 6 на рис. 3).

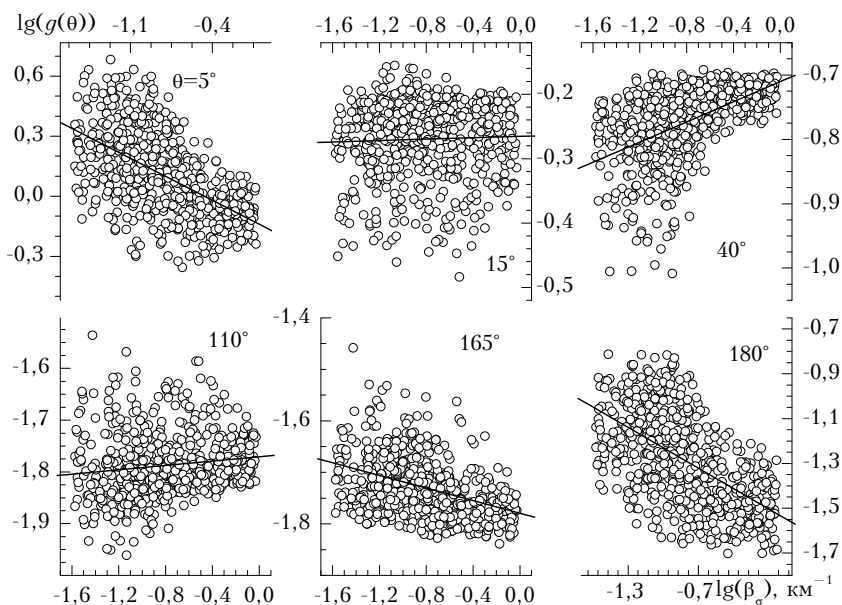


Рис. 2. Диаграммы взаимной изменчивости аэрозольного коэффициента рассеяния и значений нормированной индикатрисы рассеяния под углом 5; 15; 40; 110; 165; 180° при случайных изменениях параметров спектра размеров (2)

Кривая 2 на рис. 3 была получена в предположении, что одновременно с возможным многообразием вариантов дисперсного состава дымки изменяются (также случайным образом и независимо для каждой фракции) оптические постоянные аэрозольных частиц, в частности в интервале от  $m_u = 1,65 \div i 0,009$  до  $m_l = 1,34 \div 0,001$ . Кривая 3 на том же рисунке была получена при тех же предположениях, что и кривая 2, но при этом вариации параметров  $F_i$  уже не нейтрально-равномерны по интервалу, а центрированы, хотя и с достаточно широким распределением относительно среднего значения.

Для имитации нормального распределения был использован достаточно распространенный способ преобразования пары независимых, равномерно распределенных на интервале (0,1) чисел  $\xi_1, \xi_2$  в пару независимых величин, распределенных нормально:

$$\eta_1 = \sqrt{-\ln \xi_1} \cdot \ln \sigma \cos 2\pi \xi_2, \quad (11)$$

$$\eta_2 = \sqrt{-\ln \xi_2} \cdot \ln \sigma \sin 2\pi \xi_1, \quad (12)$$

где, определяя конкретное значение величины  $\ln \sigma$ , можно регулировать разброс значений  $\eta_1, \eta_2$  относительно центра интервала вариаций, в частности для кривой 2 на рис. 2 –  $\ln \sigma = 2$ . Кривые 3–5 как раз и иллюстрируют возможную трансформацию угловой зависимости  $k(\theta)$  при сужении статистического разброса значений  $F_i$  относительно среднего значения, соответственно при  $\ln \sigma = 0,7; 0,5$  и  $0,35$ .

Кроме того, необходимо отметить, что основным условием постепенного сближения теоретически рассчитанных кривых и эмпирических данных на рис. 3 является предположение о наличии статистических вариаций показателя преломления аэрозольных частиц. В частности, соответствующие модельные оценки показывают, что при отсутствии вариаций комплексного показателя преломления сам по себе фактор сужения статистических вариаций параметров  $F_i$  не влечет сближения теоретических данных

с эмпирическими: отличие угловой зависимости  $k(\theta)$  от кривых 1, 2 в этом случае незначительно. В то же время расчеты показали, что дальнейшее сужение интервала изменения параметров  $F_i$  нежелательно, поскольку ансамбль реализаций  $n(r)$  теряет статистическое разнообразие и уже не в состоянии будет охватить реально фиксируемое разнообразие спектров в [7–9].

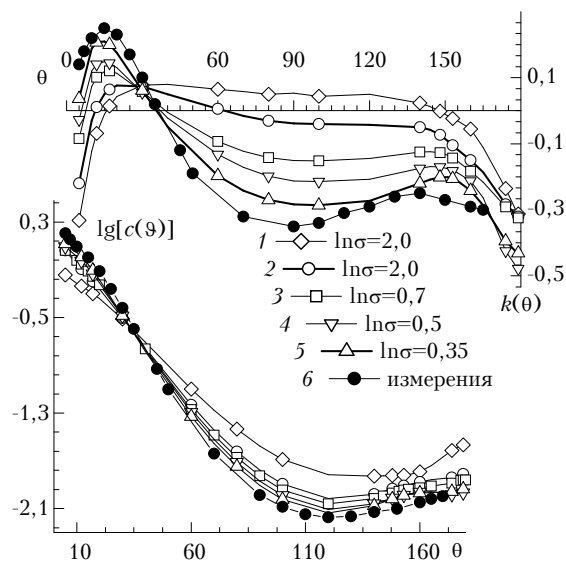


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициентов  $k(\theta)$  и  $c(\theta)$  регрессионной модели (1) при сужении интервала вариаций параметра модели  $F_2$  в сопоставлении с данными эмпирической модели [3]

Далее был реализован численный эксперимент (результаты представлены на рис. 4), в котором формировалось аналогичное варианту кривой 3 на рис. 3 многообразие спектра размеров. В дополнение к этому для каждой реализации  $n(r)$  моделировалось случайное значение относительной влажности, и в соответствии с ранее изложен-

ной методикой вносилась поправка на состояние влажности как в спектр размеров, так и значение показателя преломления каждой фракции и постепенно расширялся интервал вариаций значений относительной влажности (см. динамику кривых 1–5 на рис. 4.)

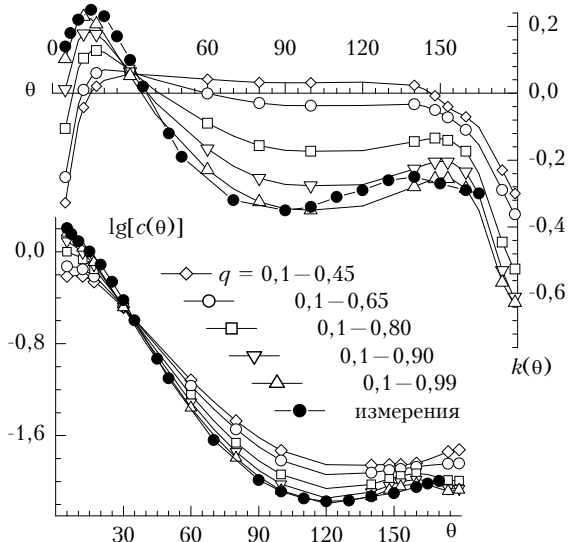


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициентов  $k(\theta)$  и  $c(\theta)$  регрессионной модели (1) при увеличении интервала вариаций относительной влажности

Корректировка случайной реализации спектра размеров на конкретное значение относительной влажности расширила интервал изменения значений функции распределения аэрозольных частиц по размерам примерно в 4–5 раз, что позволило обеспечить адекватное (натурным измерениям) статистическое разнообразие ансамбля реализаций спектров  $n(r)$ . Кривая 1 на рис. 4 рассчитана для узкого интервала вариаций значений относительной влажности  $q$  от 0,1 до 0,45. В рамках данной имитации предполагалось оценить специфику вариаций оптических свойств дымки при относительно стабильной сухой атмосфере как близкой аналогии аридной климатической зоне.

Последующие кривые 2–5 иллюстрируют возможную динамику формы  $k(\theta)$  в связи с увеличением интервала вариаций  $q$  вплоть до значений 0,99. Как видно из полученных оценок, именно взаимно согласованные изменения оптических постоянных и спектра размеров частиц дымки, обусловленные устойчивыми суточными колебаниями относительной влажности, скорее всего, являются главной причиной формирования эмпирически обнаруженной угловой зависимости коэффициента  $k(\theta)$ . В отличие от  $k(\theta)$  варианты угловой зависимости  $c(\theta)$  указывают на то, что данный коэффициент модели зависит не столько от интервала вариаций микроструктурных параметров  $m_i, r_i, b_i, F_i$ , сколько от их средних значений по ансамблю реализаций.

На рис. 5,а представлена случайная выборка из генеральной совокупности реализаций, иллюстрирующая видоизменение формы угловой зависимости нормированной индикатрисы рассеяния только при случайных изменениях спектра размеров частиц атмосферной дымки, т.е. исходя из аналогичных микроструктурных данных, по которым была рассчитана кривая 2 на рис. 3. На рис. 5,б представлены аналогичные данные, но в них помимо случайных изменений спектра размеров были имитированы микро-

структурные изменения спектра размеров и показателя преломления частиц дымки с относительной влажностью, т.е. исходя из микроструктурных данных, аналогичных тем, по которым была рассчитана кривая 5 на рис. 3.

Как видно из представленных выше данных, помимо увеличения амплитуды колебания значений нормированной индикатрисы светорассеяния в зависимости от относительной влажности обращает на себя внимание тот факт, что если для углов 20–145° наблюдается достаточно устойчивая и взаимно согласованная тенденция изменения значений этой индикатрисы, то в области ореола, а также вблизи локационных углов воздействия относительной влажности могут привести и к нерегулярному ходу изменения  $g(\theta)$  с ростом мутности.

С целью изучения возможных причин формирования конкретного вида угловой зависимости  $k(\theta)$  по эмпирическим данным, которые могут быть получены при соответствующей постановке эксперимента в других регионах, были выполнены модельные оценки, в которых рассмотрена роль вариаций микрофизических параметров дымки, и прежде всего ее аккумулятивной фракции.

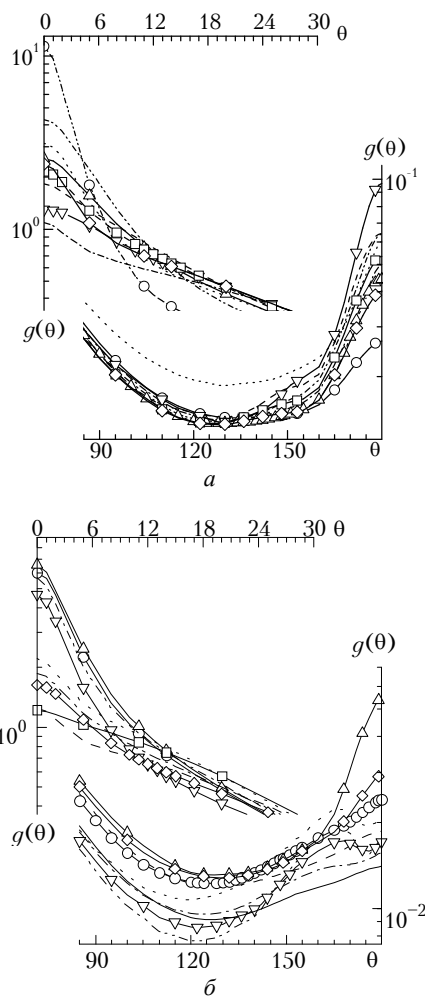


Рис. 5. Видоизменение формы угловой зависимости нормированной индикатрисы рассеяния: а – при случайных изменениях спектра размеров без учета возможных колебаний относительной влажности; б – при наложении случайных колебаний относительной влажности на статистику случайных изменений спектра размеров

В частности, было рассмотрено видоизменение  $k(\theta)$  в связи со сдвигом моды распределения аккумулятивной фракции относительно шкалы размеров. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Помимо влияния значений модального радиуса на  $k(\theta)$  расчетные данные аналогичной направленности представлены на рис. 7 и 8, но здесь уже рассмотрено влияние возможных вариаций параметров  $F_2$  и  $b_2$  модели (2), регламентирующих соответственно общее количественное содержание частиц аккумулятивной фракции и среднестатистическую ширину моды распределения.

Из содержания представленных на рис. 6–9 модельных оценок следует, что наиболее существенным фактором, определяющим форму угловой зависимости  $k(\theta)$  для длины волны  $\lambda = 0,55$  мкм, является среднестатистический размер частиц аккумулятивной фракции. При этом вариации параметров  $b_2$  и  $F_2$  хотя и могут повлечь небольшие изменения  $k(\theta)$  в интервале углов 20–40 и 90–165°, но в целом не изменяют форму угловой зависимости.

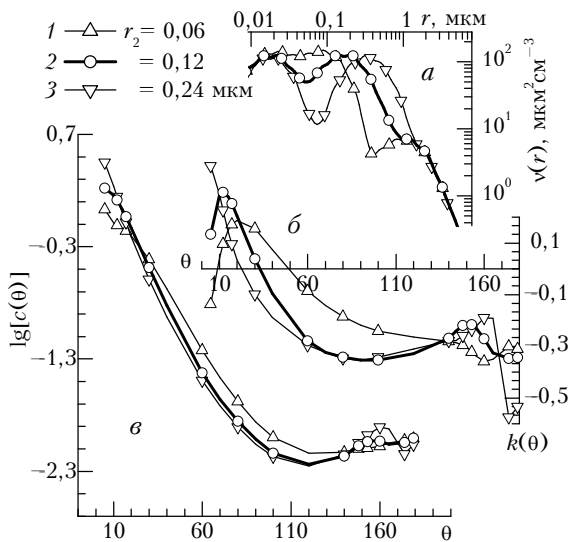


Рис. 6. Видоизменение угловых зависимостей  $k(\theta)$  ( $\delta$ ) и  $c(\theta)$  ( $\epsilon$ ) при различных значениях  $r_2$  – модального радиуса в (1) при  $\nu = 3$  в среднестатистическом спектре размеров частиц аккумулятивной фракции (а)

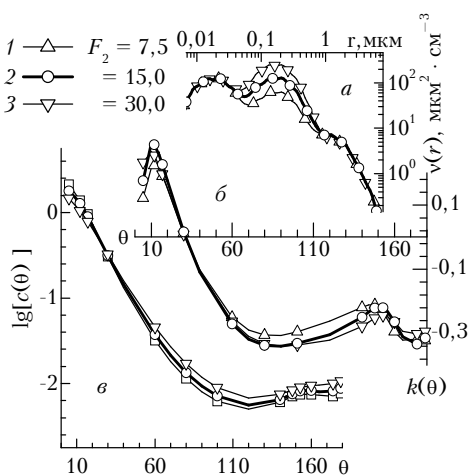


Рис. 7. Видоизменение угловых зависимостей  $k(\theta)$  ( $\delta$ ) и  $c(\theta)$  ( $\epsilon$ ) при 4-кратном изменении среднестатистического значения параметра  $F_2$  спектра размеров частиц аккумулятивной фракции (а)

Как показали соответствующие численные эксперименты, для данной длины волны вариации параметров спектра размеров, определяющих содержание других фракций, влекут за собой деформации формы  $k(\theta)$  второго порядка значимости по сравнению с аккумулятивной фракцией. Например, более чем 10-кратное изменение среднего содержания грубодисперсной фракции влечет лишь небольшие изменения коэффициентов разложения в области ореола и локационных углов (см. рис. 9).

В то же время из результатов модельных оценок, представленных на рис. 6–9, можно сделать вывод, что наиболее сложную, регионально зависимую динамику аэрозольной индикатрисы светорассеяния следует ожидать вблизи локационных углов рассеяния, в том числе и для лидарного отношения.

Таким образом, выполненный количественный анализ содержания модели (1) показывает, что в статистике атмосферной изменчивости параметров аэрозольного светорассеяния в длинных рядах наблюдения можно выделить два фактора.

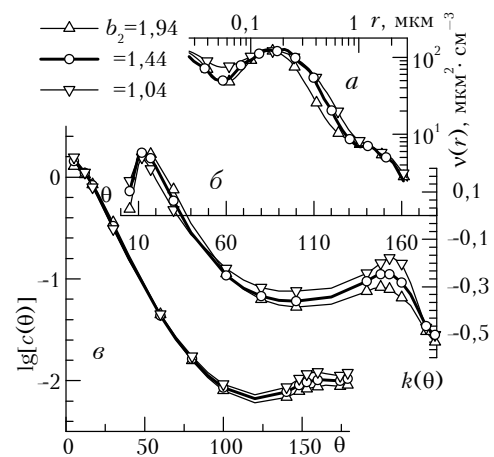


Рис. 8. Видоизменение угловых зависимостей  $k(\theta)$  ( $\delta$ ) и  $c(\theta)$  ( $\epsilon$ ) при различных значениях параметра распределения частиц аккумулятивной фракции  $b_2$  в среднестатистическом спектре размеров (а)

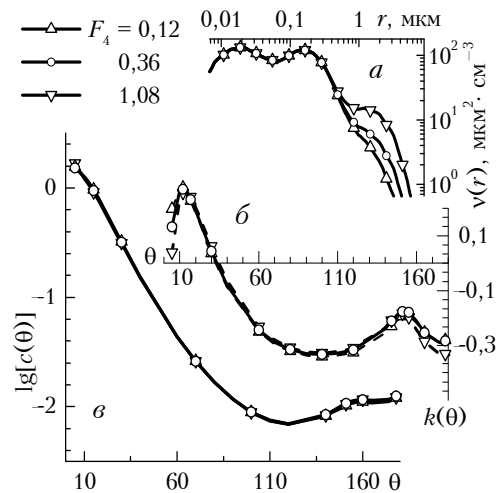


Рис. 9. Видоизменение угловых зависимостей  $k(\theta)$  ( $\delta$ ) и  $c(\theta)$  ( $\epsilon$ ) при различных значениях параметра  $F_4$  грубодисперсной фракции  $b_2$  в среднестатистическом спектре размеров частиц (а)

Во-первых, достаточно быструю и локальную реакцию дисперсной системы на изменение относительной влажности воздуха, которая зависит от конкретной гирокопической активности фракций и количественных пропорций между ними, т. е. дисперсно-химического состава.

А во-вторых, внешние геофизические процессы, которые определяют локальную статистику изменения самой относительной влажности, а также слабосвязанную причинно-следственной связью статистику изменений микроструктурных параметров аэрозоля. Так как длина ряда наблюдений обычно значительно превосходит среднее время жизни аэрозолей в слое, то данные измерений характеризуют множество разнообразных синоптических ситуаций. Если к этому добавить еще и пространственное разнообразие распределения фракций в различных типах воздушных масс, то нетрудно понять, почему по продолжительным рядам наблюдений не удастся указать универсальных эмпирических зависимостей между абсолютными значениями интегральных параметров светорассеяния и относительной влажностью, хотя для отдельных серий измерений подобные связи иногда проявляются. В ряде публикаций отмечено даже существенно нерегулярное изменение коэффициента аэрозольного ослабления и относительной влажности [23, 24].

Из полученных модельных оценок видно, что конкретный вид взаимосвязи оптических параметров в модели (1) может иногда быть следствием не гидрооптической реакции конкретного дисперсного состава аэрозольных фракций на изменение состояния увлажненности, а отражением конкретной статистики микроструктурных изменений аэрозоля в результате воздействия других геофизических факторов.

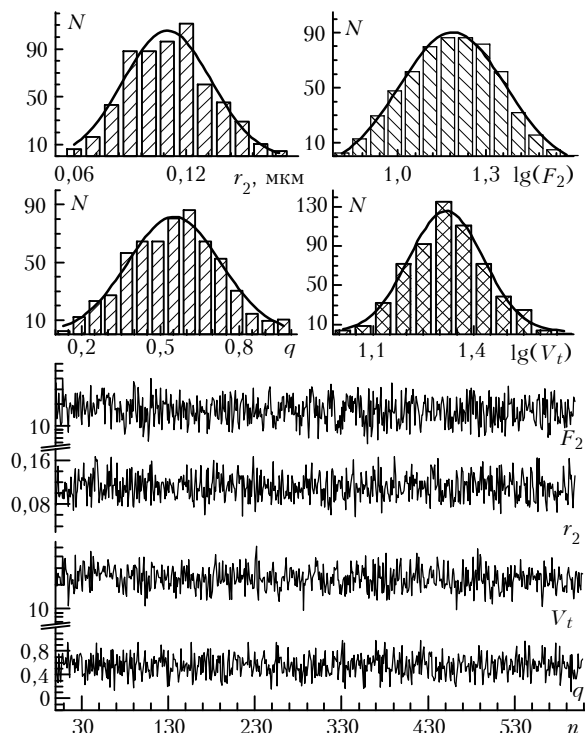


Рис. 10. Диаграммы частоты повторения значений микроструктурных параметров аэрозольной компоненты и относительной влажности при реализации варианта расчета кривой 5 на рис. 3 и их взаимное изменение от реализации к реализации в рамках данного статистического ансамбля

Статистическое множество частично взаимосвязанных значений микроструктурных параметров приземной дымки  $m_i, r_i, b_i, F_i$ , установленное из предыдущего анализа атмосферной изменчивости угловых функций аэрозольного светорассеяния, было положено в основу численного эксперимента с целью прогноза спектральной изменчивости модели и ее экстраполяции на другие длины волн зондирования, а также в основу анализа взаимной изменчивости иных параметров аэрозольного светорассеяния, в том числе труднодоступных для непосредственных измерений. Результаты модельных оценок представлены на рис. 10–15.

Кроме того, следует отметить: несмотря на то, что статистика реализаций микроструктурных параметров (за исключением параметра  $F_i$ ) и относительной влажности в численных экспериментах изначально закладывалась в виде нормального распределения в линейном масштабе (см. рис. 10), тем не менее статистический ансамбль прогнозируемых величин (см. рис. 11–13) оказался более близким к логарифмически нормальному закону, использованному для определения статистики значений  $F_i$ . Причем конкретный вид статистического распределения метеорологических и микроструктурных параметров может предопределить не только статистику распределения параметров светорассеяния, но и сам вид среднестатистической закономерности их атмосферной изменчивости.

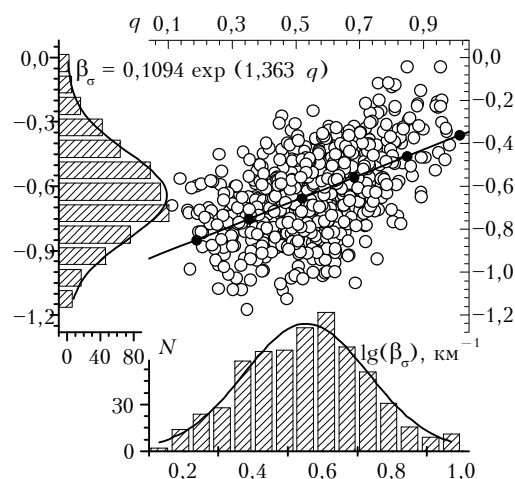


Рис. 11. Диаграмма взаимного изменения значений аэрозольного коэффициента рассеяния  $\beta_\sigma$  и относительной влажности  $q$  и их частотное распределение по интервалу изменчивости. Статистика изменений микроструктурных параметров аналогична варианту кривой 5 на рис. 3

Поэтому анализ среднестатистической взаимосвязи коэффициента аэрозольного светорассеяния и относительной влажности имеет смысл рассмотреть не в линейном масштабе вариаций  $\beta_\sigma$ , как это делается в некоторых публикациях, а в логарифмическом, при котором статистический ансамбль точек более равномерно распределен относительно аппроксимирующей зависимости (см. рис. 12), хотя в линейном масштабе имеет форму, близкую к треугольнику.

Несмотря на заметный разброс значений анализируемых величин на рис. 12, 13, выполненные модельные оценки все же позволяют оценить некоторые среднестатистические закономерности взаимного изменения значений коэффициента аэрозольного светорассеяния  $\beta_\sigma$  и суммарного объема аэрозольных частиц  $V_i$  всех фракций при вариациях относительной влажности  $q$ . В частности, для коэффициента рас-



сеяния и относительной влажности характерно достаточно размытое облако точек с коэффициентом корреляции, равным 0,531, и средней экспоненциальной зависимостью

$$\beta_{\sigma} = 0,1094 \exp(1,363 q), \quad (13)$$

в то время как для коэффициента рассеяния и суммарного объема частиц характерны более тесная корреляции (0,777) и степенная зависимость последней величины от первой

$$V_i = (41,0 \pm 6,0) \beta_s^{(0,459 \pm 0,15)}. \quad (14)$$

При интерпретации статистических данных, представленных на рис. 12 в координатной системе  $\ln \beta_{\sigma}$  и  $\ln(1-q)$ , функциональная зависимость (13) может быть трансформирована в традиционную форму Кастана-Хенела [22] со следующими коэффициентами:

$$\beta_{\sigma} = 0,147 (1-q)^{-0,458}. \quad (15)$$

Из графического сопоставления зависимостей (13) и (15) на рис. 13,а, на фоне исходного статистического ансамбля, приведенного в линейной системе координат  $\beta_{\sigma}$  и  $q$ , видно, что зависимость (13) более точно характеризует основную статистику реализаций с  $q < 0,8$ , но не пригодна

для ситуаций с  $q > 0,85$ , где более приемлема функциональная зависимость вида (15).

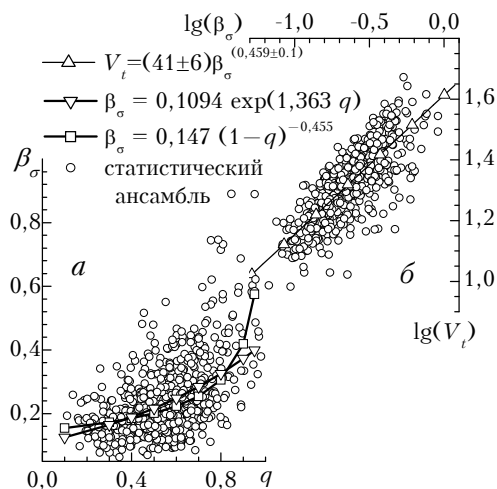


Рис. 12. Диаграмма взаимного изменения значений аэрозольного коэффициента рассеяния  $\beta_{\sigma}$ , относительной влажности  $q$  в линейном масштабе (а) и суммарного объема частиц  $V_i$  всех аэрозольных фракций (б). Исходные данные аналогичны рис. 11

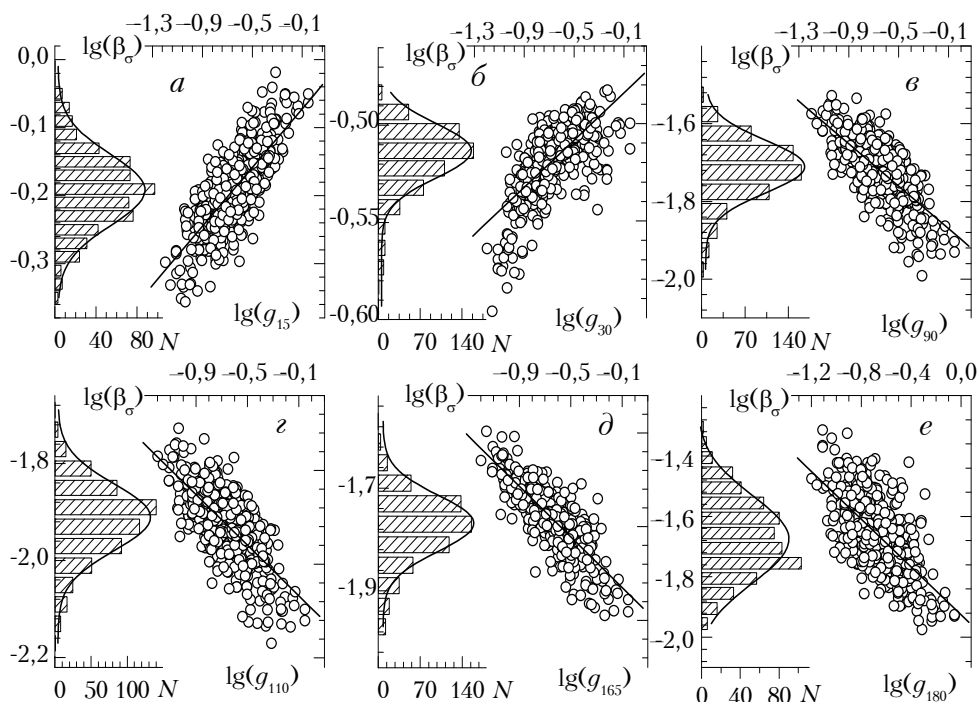


Рис. 13. Диаграммы взаимной изменчивости значений аэрозольного коэффициента рассеяния и нормированной индикатрисы светорассеяния под углом  $\theta = 15; 30; 90; 110; 165; 180^\circ$ , а также гистограммы повторяемости значений этих величин

По результатам целенаправленных натуральных измерений взаимной изменчивости указанных величин значение так называемого параметра конденсационной активности  $\gamma$  в (15) колеблется в интервале  $[0,3-0,8]$  [22], в нашем случае  $\gamma = 0,458$ . Значение второго коэффициента в (15) по разным измерениям также неоднозначно, что объясняется конкретными особенностями формирования микроструктуры дымки и статистики атмосферных ситуаций.

На основе полученных теоретических оценок рассмотрена возможность экстраполяции однопараметрической модели, эмпирически установленной для длины волны  $\lambda = 0,55$  мкм, на другие длины волн лазерного зондирования 0,53; 0,6943 и 1,06 мкм (см. рис. 14), в том числе на локационные углы. В последнем случае очевидна необходимость дифференцированного подхода к априорному выбору параметров модели, в частности с учетом региональной специфики обновления состава частиц грубодисперсной фракции.

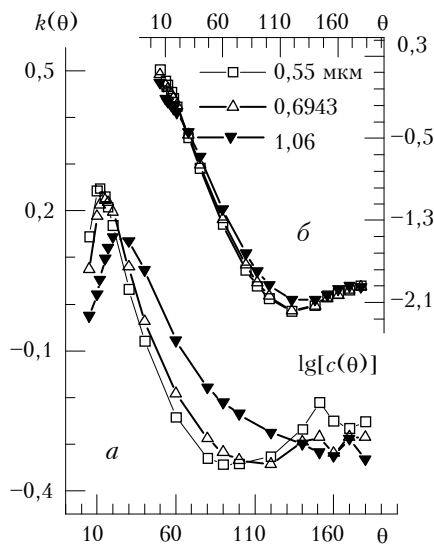


Рис. 14. Модельная экстраполяция угловой зависимости коэффициентов  $k(\theta)$  и  $c(\theta)$  регрессионной модели на другие длины волн лазерного зондирования  $\lambda = 0,53; 0,6943; 1,06$

### 5. Выводы и замечания

Из содержания представленных модельных оценок следует, что однопараметрическая модель изменения характеристик аэрозольного светорассеяния приземной дымки совместима с реально наблюдаемым многообразием ее дисперсного состава при условии, что для этого многообразия состояний характерны как вариативность оптических постоянных, так и наличие динамических изменений спектра размеров частиц с относительной влажностью. Применение однопараметрической модели более оправдано для атмосферных ситуаций, в которых наблюдается значительная динамика по относительной влажности.

Далее, несмотря на линейно-центрированную статистику реализаций исходных микрофизических параметров аэрозоля и относительной влажности, для нормированных значений угловых функций аэрозольного светорассеяния более характерна логарифмически-нормальная статистика распределения искомым величин.

Кроме того, наиболее существенным фактором, определяющим форму угловой зависимости  $k(\theta)$  для длины волны  $\lambda = 0,55$  мкм, является среднестатистический размер частиц  $r_2$  аккумулятивной фракции. При этом вариации параметров  $b_2$  и  $F_2$  хотя и могут повлечь некоторые изменения  $k(\theta)$  в интервале углов 20–40 и 90–165°, но в целом не изменяют форму угловой зависимости.

Причем конкретный вид угловой зависимости коэффициента  $k(\theta)$  предопределяется как шириной интервала вариаций микроструктурных параметров:  $m_i, r_i, b_i, F_i$ , так и их взаимной динамикой, а  $c(\theta)$  – их средними значениями по ансамблю реализаций. Таким образом, однопараметрическая модель как среднестатистическая закономерность является обобщенным представлением средних состояний дымки, наиболее часто воспроизводимых в результате совокупного воздействия геофизических факторов.

Фактически этот набор состояний приобретает особый статус, относительно которого другие реализации, являясь, по сути, отклонениями от траектории среднестатистической (атмосферной) изменчивости дымки, приобретают смысл аномальных, а при значительных отклоне-

ниях – и признак возмущенных состояний. Устойчивые квазициклические колебания метеоэлементов приземной атмосферы способствуют слиянию разнородных компонент (первичных и вторичных) в некое единое целое. По-видимому, именно в этом третьем качестве, последовательно продвигаясь вдоль наиболее вероятных состояний, определяемых моделью (1), в интервал пониженных значений мутности атмосферы, и следует решать проблему определения фоновых свойств аэрозольной компоненты как сбалансированного или (следуя терминологии Фридландера) самосохраняющегося аэрозольного фона атмосферных процессов.

Суточные изменения метеопараметров приземного слоя своими многократными колебаниями сглаживают импульсы спорадических локальных микроструктурных изменений приземной дымки, способствуют более интенсивному вовлечению аэрозолей вторичного происхождения и водяного пара в микроструктуру оптически наиболее активной фракции и обеспечивают таким образом реально наблюдаемую модуляцию случайных колебаний параметров аэрозольного светорассеяния. В этом смысле приземный слой можно рассматривать как некоторый сборочный цех, в котором различные компоненты микроструктуры атмосферной дымки предварительно обрабатываются и подгоняются друг к другу, перед выносом из слоя трения в свободную атмосферу, уже как единодисперсное целое.

Таким образом, представленные расчетные оценки показывают, что на фоне сложной внешней геофизической обусловленности локальных (внутренних) процессов в аэрозолях эвристическая значимость модели (1) заключается не только в том, что она позволяет выявить информационно наиболее емкие характеристики в качестве предикторов светорассеивающих свойств дымки, но и в аккумулятивном виде представить через конкретные значения параметров  $k(\theta)$ ,  $c(\theta)$  информацию о наиболее характерных состояниях дисперсной компоненты в составе атмосферы, в данном случае приземного слоя. По образному выражению Г.В. Розенберга, в таких малопараметрических моделях «запоминается» информация о наиболее значимых для аэрозоля атмосферных процессах.

И наконец, отметим еще одно важное обстоятельство, которое обнаруживается по результатам выполненного анализа. Несмотря на то, что изучение аэрозольной компоненты атмосферы в сложных реакциях на разнообразные внешние воздействия, в том числе и на естественные воздействия геофизических факторов, заметно усложняет постановку целенаправленных оптических экспериментов и создает дополнительные трудности анализа полученных данных, но вместе с тем нельзя не признать, что при данном подходе открываются принципиально новые возможности для более глубокого анализа первопричин проявления тех или иных свойств исследуемого объекта. Кстати, данный вывод следует не только из представленных результатов, но и из анализа специфики микроструктурных изменений пиролизных дымов в процессе релаксации в замкнутом объеме [25], где намеренно были активизированы микропроцессы, определяющие трансформацию дисперсной структуры дымов, в частности сухого осаждения частиц на стенки камеры, и их коагуляции.

Исследование оптических свойств аэрозоля в динамике или на статистическом множестве состояний позволяет оценить не только наиболее характерные параметры объекта, но и степень его отзывчивости к внешним воздействиям, процессам внутренней трансформации. Например,

многомерный вектор  $k(\theta)$  в (1) определяет именно степень подвижности состояния приземной дымки, ее лабильность. Поэтому через анализ микрофизической обусловленности конкретного вида  $k(\theta)$  можно реализовать исследование весьма тонких специфических свойств объекта, которые в статике при обращении отдельных реализаций индикатрисы рассеяния  $g(\theta)$  могут остаться незамеченными на фоне элементов микроструктуры, определяющих приоритетный вклад в формирование конкретного вида  $g(\theta)$ . В то же время некоторые малозначимые в статике элементы микроструктуры дымки, обнаруживая весьма существенную реакцию на внешние воздействия, проявляют себя как факторы формирования статистического разнообразия вида угловых функций аэрозольного светорассеяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-05-03177).

1. Креков Г.М., Панченко М.В., Рахимов Р.Ф. К вопросу о среднестатистической изменчивости угловых характеристик аэрозольного светорассеяния // VII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1982. Ч. 1. С. 127–130.
2. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. 1960. № 3.
3. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 1. С. 53–60.
4. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 202 с.
5. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. 295 с.
6. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.
7. Willeke K., Whitby K.T. et al. Size distribution of Denver aerosols a comparison of the sizes // Atmos. Environ. 1974. V. 8. P. 609–633.
8. Willeke K., Whitby K.T. Atmospheric aerosol: size distribution interpretation // J. Air Poll. Contr. 1975. V. 25. P. 529–534.
9. Aerosols and their climatic effect. Report of WMO (CAS) radiation commission of IAMAP Meeting of Experts. WCP-55, Williamsburg, Virg., USA. March, 1983. 110 p.
10. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Advances in Gephys. 1976. V. 19. P. 74–183.
11. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 207 с.
12. Пришивалко А.П. Влияние относительной влажности воздуха на элементы матрицы рассеяния света системами однородных и неоднородных частиц атмосферного аэрозоля // Труды ИЭМ, 1978. Вып. 18 (71). С. 128–140.
13. Hanel G. New Results Concerning the Dependence of Visibility on Relative Humidity and their Significance in Model for Visibility Forecast // Beitrage zur Physik der Atmosph. 1971. V. 44. P. 137–167.
14. Wells W.C., Gal G., Munn M.W. Aerosol distributions in maritime air and predicted scattering coefficient in the infrared // Appl. Optics. 1977. V. 16. № 3. P. 654–659.
15. Tuomi T.J. The influence of relative humidity and its stratification on lidar backscatter // Beitr. Phys. Atmosph. 1976. Bd. 49. P. 98–113.
16. Kiang C.S., Cadle R.D., Hamill P., Mohnen V.A., Yue G.K. Ternary nucleation applied to gas to particle conversion // J. Aerosol Sci. 1975. V. 6. P. 465–474.
17. Meszaros A. On the variation of size distribution of large and giant atmospheric particles as function of relative humidity // Tellus. 1971. V. 4–5. P. 436–440.
18. Volz F. Infrared optical constants of aerosols at some locations // Appl. Optics. 1983. V. 22. № 11. P. 3690–3700.
19. Ивлев Л.С., Попова С.И. Комплексный показатель преломления диспергированной фазы атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1973. Т. 9. № 8. С. 1034–1043.
20. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 370 с.
21. Palmer K.F., Williams B. Optical constant of sulfuric acid: application to the clouds of Venus // Appl. Optics. 1975. V. 14. № 1. P. 208–219.
22. Горчаков Г.И. Поляриметрические исследования свойств и процессов трансформации атмосферного аэрозоля: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1986. 500 с.
23. Щелканов Н.Н. Исследование ослабления оптического излучения аэрозолем и водным паром в атмосфере аридной зоны: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1997. 156 с.
24. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Относительная влажность воздуха и изменчивость аэрозольного ослабления видимого и ИК-излучения // I Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск, 1994. С. 68–69.
25. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С. Микроструктурные изменения дымок по результатам диаграммного анализа параметров светорассеяния // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 9. С. 931–937.

**R.F. Rakhimov, M.V. Panchenko. To the Problem of One-Parameter Model for Atmospheric Variability of Aerosol Light-scattering Angular Functions.**

Based on model estimates, a problem of random and regular actions of geophysical factors in a formation of empirical one-parameter model of atmospheric variability of light-scattering phase function of the ground haze is analyzed in the paper. The applicability range of the model is discussed. It is shown, that the analyzed model of interconnected variation of the aerosol light-scattering characteristics well agrees with realistically observable variety of the ground haze dispersion contents providing significant variability of optical constants and characteristic variation of size spectrum of particles with relative moisture. The applicability of the one-parameter model is more useful in the situations with noticeable dynamics of the relative moisture.