

**В.В. Веретенников**

## **О ВЛИЯНИИ ВЕТРА НА ОПТИКО-МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЫМКИ МОРСКОГО ПРИБРЕЖНОГО РАЙОНА**

Представлены методика и результаты интерпретации спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в атмосфере морского прибрежного района с целью восстановления количественной информации о микроструктуре дымки и ее трансформации в зависимости от скорости ветра. По результатам решения обратной задачи проанализировано влияние скорости ветра на содержание частиц мелко- и грубодисперсной фракций, а также восстановлен угловой ход индикатрис рассеяния в видимой и ИК-областях спектра при различной скорости ветра. Полученные результаты могут быть использованы при учете изменчивости оптико-микроструктурных моделей дымки морского происхождения под влиянием ветрового режима.

**1. Введение.** Настоящая статья продолжает серию публикаций [1–3] об исследовании микрофизической структуры атмосферных дымок в различных геофизических условиях по результатам интерпретации их светорассеивающих характеристик на основе решения обратных задач. Для выявления общих закономерностей изменчивости микрофизических параметров дымок, проявляющихся в результате воздействия совокупности механизмов образования и трансформации аэрозоля в разнообразных геофизических и метеорологических условиях, в качестве анализируемых исходных данных рассматривались оптические модели поляризационных индикатрис рассеяния [1] и спектрального ослабления [2] дымки морского прибрежного района, а также модель компонент матрицы рассеяния континентальной дымки [3]. Входным параметром упомянутых оптических моделей был выбран также оптический параметр — коэффициент ослабления света на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм, в изменчивости которого в значительной степени отражено воздействие комплекса аэрозольных процессов.

Изучение дифференцированного влияния на оптико-микрофизические характеристики дымки какого-либо одного геофизического фактора требует отбора экспериментальных данных, полученных в условиях постоянства всех остальных внешних факторов, что существенно сужает объем экспериментальных реализаций, пригодных для анализа. Пример решения подобной задачи представлен в работе [4], в которой исследовано влияние скорости ветра на аэрозольное ослабление излучения видимого и ИК-диапазона в атмосфере морского прибрежного района. Анализируемые в [4] данные получены на основе статистической обработки измерений спектральной прозрачности атмосферы на Крымском побережье Черного моря (п-ов Тарханкут) при устойчивых ветрах со стороны моря. Трасса проходила над заливом на высоте 4 м над уровнем моря. В этих условиях авторами была взята для исследований выборка из 32 экспериментальных реализаций, разбитых на подмассивы по интервалам скоростей ветра [0,6–2,1], [2,2–3,7] и [3,8–5,8] м/с. Относительная влажность для анализируемой выборки варьировала от 72 до 96% при средних значениях в каждом подмассиве около 82%. Скорость приповерхностного ветра, наряду с влажностью воздуха, относится к числу основных факторов, от которых зависит микроструктура солевых аэрозольных частиц. Анализ результатов экспериментальных исследований [5–6] поступления морских аэрозолей в атмосферу с ростом скорости ветра свидетельствует как о монотонном увеличении массовой концентрации солевых частиц, так и изменении дисперсного состава за счет повышения доли грубодисперсной фракции частиц. Количественное описание этой зависимости дает неоднозначные результаты [5] и определяется спецификой физико-географических условий конкретного района.

Проведенный в [4] статистический анализ экспериментальных данных показал, что увеличение скорости ветра  $v$  до 3 м/с сопровождается ростом коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  (рис. 1) во всем рассматриваемом диапазоне длин волн, что соответствует прямым микроструктурным измерениям [5–6] и находится в согласии с данными численного моделирования [7]. Однако при дальнейшем возрастании скорости ветра до 6 м/с коэффициенты аэрозольного ослабления уменьшаются в ИК-области спектра. В [4] дана физическая интерпретация обнаруженной немонотонной зависимости  $\alpha(\lambda)$  от скорости ветра. В настоящей статье на основе решения обратной задачи определен дисперсный состав аэрозольной дымки, которая адекватна по спектральному ослаблению излучения зависимости от скорости ветра, установленной в [4], и оценено влияние скорости ветра на содержание частиц субмикронного и грубодисперсного диапазонов размеров.

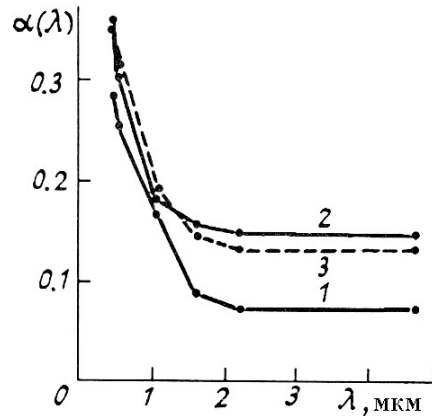


Рис. 1. Средние спектральные зависимости коэффициентов aerosольного ослабления излучения  $\alpha(\lambda)$  по интервалам скоростей ветра [0,6–2,1] (кривая 1), [2,2–3,7] (2) и [3,8–5,8] м/с (3) в приводном слое атмосферы морского прибрежного района [4]

**2. Методика решения обратной задачи.** При построении алгоритма обращения спектральных зависимостей коэффициента aerosольного ослабления априорно предполагалось, что искомые микроструктурные распределения образованы мелкодисперсной ( $m$ ) ( $r < 1$  мкм) и грубодисперсной ( $\Gamma$ ) фракциями частиц. В пользу такого предположения говорят результаты интерпретации однопараметрической модели спектрального ослабления дымки морского прибрежного района [2], а также данные выполненных Ю.А. Пхалаговым и В.Н. Ужegovым исследований спектральных зависимостей коэффициента ослабления света, которые основаны на применении линейного множественного регрессионного анализа [8]. В соответствии со сказанным коэффициент aerosольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  может быть представлен в виде

$$\alpha(\lambda) \equiv \alpha_m(\lambda) + \alpha_\Gamma(\lambda) = \int_0^R K(\lambda, r) [s_m(r) + s_\Gamma(r)] dr, \quad (1)$$

где  $K(\lambda, r)$  — фактор эффективности ослабления для сферической частицы радиуса  $r$ ,  $s(r)$  — распределение геометрического сечения по размерам, а индексы « $m$ » и « $\Gamma$ » относятся к мелко- и грубодисперсной фракциям частиц. Известно, что спектральные измерения коэффициента aerosольного ослабления наиболее информативны относительно содержания тех частиц, размеры которых близки к длине волны  $\lambda$ . Разработанный алгоритм основан на учете различий в оптическом проявлении двух фракций, связанных с особенностями поведения фактора эффективности ослабления  $K$  ( $K^\Gamma$ ) в различных областях спектра. В видимой области спектра фактор  $K(\lambda, r)$  для частиц « $\Gamma$ »-фракции близок к константе, осциллируя с убывающей амплитудой в окрестности числа 2, так что приближенно можно принять  $\alpha_\Gamma(\lambda) \approx 2S_\Gamma$ , где  $S_\Gamma$  — суммарное геометрическое сечение частиц « $\Gamma$ »-фракции. При этом уравнение (1) для видимого диапазона длин волн запишется в виде

$$\int_0^{r^*} K(\lambda, r) s_m(r) dr + 2S_\Gamma = \alpha(\lambda), \quad (2)$$

где  $r^* = 1$  мкм — граничное значение, разделяющее диапазон размеров частиц на « $m$ »- и « $\Gamma$ »-фракции. Из уравнения (2) видно, что для спектральной характеристики  $\alpha(\lambda)$  в видимом диапазоне спектра появление « $\Gamma$ »-фракции приводит к сдвигу на величину  $2S_\Gamma$ . При этом измерения  $\alpha(\lambda)$  практически малоинформативны относительно « $\Gamma$ »-части распределения  $s(r)$  и несут информацию лишь о ее интегральном содержании — суммарном сечении  $S_\Gamma$ . Уравнение (2) определено относительно распределения частиц « $m$ »-фракции  $s_m(r)$  и может быть решено с использованием известных регуляризирующих алгоритмов [9]. При этом в число неизвестных можно включить величину  $S_\Gamma$ .

Напротив, в ИК-области спектра измерения  $\alpha(\lambda)$  несут информацию преимущественно о содержании частиц « $\Gamma$ »-фракции, в то время как вклад частиц « $m$ »-фракции в ослабление ИК-излучения незначителен и определяется поведением ядра  $K(\lambda, r) \sim \lambda^{-c}$ , где  $c$  — константа. В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$\int_{r^*}^R K(\lambda, r) s_\Gamma(r) dr + A\lambda^{-c} = \alpha(\lambda), \quad (3)$$

где  $s_r(r)$  искомое распределение «г»-фракции, а второе слагаемое в левой части представляет вклад в ослабление «м»-фракции в ИК-области спектра.

Схема совместного обращения системы уравнений (2) и (3) относительно искомых функций  $s_m(r)$  и  $s_r(r)$  формально может быть представлена в следующем виде. Рассмотрим дискретный аналог уравнения (1)

$$Ks = \alpha \quad (4)$$

и представим вектор искомого решения в виде прямой суммы  $s = s_m \oplus s_r$ . Тогда систему уравнений (2), (3) можно записать в виде

$$\begin{aligned} A_1 s_m + A_2 s_r &= \alpha_1, \\ A_3 s_m + A_4 s_r &= \alpha_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4$  – блоки, составляющие матрицу

$$K = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а векторы  $\alpha_1, \alpha_2$  образуют прямую сумму  $\alpha = \alpha_1 \oplus \alpha_2$ . Определим из первого уравнения системы (5) вектор  $s_m$ , а из второго –  $s_r$ . В результате можно записать

$$s_m = A_1^+ (\alpha_1 - A_2 s_r); \quad s_r = A_4^+ (\alpha_2 - A_3 s_m), \quad (7)$$

где  $A_1^+$  и  $A_4^+$  – псевдообратные матрицы для матриц  $A_1$  и  $A_4$ . Для нахождения неизвестных векторов  $s_m$  и  $s_r$  из соотношений (7) может быть применен метод итераций. В простейшем случае итерационный процесс строится следующим образом. Для начального приближения  $s_r^{(0)}$  из первого уравнения системы (7) находится решение  $s_m^{(1)}$ , которое далее подставляется в правую часть второго уравнения системы (7), из которого находится решение  $s_r^{(1)}$ . Затем итерации повторяются. Достаточное условие сходимости итераций имеет вид

$$\frac{\|A_2\| \|A_3\|}{\|A_1\| \|A_4\|} \leq q < 1.$$

С учетом структуры уравнения (2) начальное приближение  $A_2 s_r^{(0)}$  в правой части (7) можно заменить на величину  $2s_r^{(0)}$ .

Таким образом, в приведенной схеме восстановления микроструктурного распределения  $s(r)$  на основе его декомпозиции на «м»- и «г»- фракции обращение системы (4) большой размерности заменялось на последовательное обращение двух систем (7) меньшей размерности. Эффективность методики проверялась в численных экспериментах. Практическим результатом описанной процедуры является повышение устойчивости и точности решения обратной задачи. При численной реализации представленной методики в части построения приближенных решений  $s_m$  и  $s_r$  при обращении (7) был использован регуляризирующий алгоритм, аналогичный примененному в работе [2] с выбором параметра регуляризации по принципу минимальных невязок [10]. Восстановленное решение  $s^{(+)} = Ps$  ( $P$  – оператор проектирования на множество неотрицательных функций) дополнительно умножалось на параметр

$$\gamma = \frac{(As^{(+)}, \alpha)}{(As^{(+)}, As^{(+)})},$$

доставляющий минимум функционалу невязки  $\rho^2 = \|\gamma APs - \alpha\|^2$ .

**3. Результаты обращения.** Спектральные зависимости вещественной  $m(\lambda)$  и мнимой  $k(\lambda)$  частей комплексного показателя преломления, необходимые при вычислении ядра  $K(\lambda, r)$ , выбирались согласованно с метеорологической дальностью видимости  $S_m$  – входным параметром оптико-микрофизической модели дымки [1] подобно тому, как это было сделано в работе [2]. Спектральные зависимости коэффициента аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$ , выбранные для обращения, приведены на рис. 1 и соответствуют средним скоростям ветра 1, 4; 3,0 и 4,7 м/с (кривые 1–3) при метеорологической дальности видимости в пределах 12–15 км.

Результаты обращения экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, представлены на рис. 2, *а*, *б*. Анализ полученных результатов обращения показывает, что тип восстановленных микроструктурных распределений аналогичен модели дымки, описанной в [2]. Общим характерным признаком всех восстановленных распределений  $s(r)$  является, как априори и предполагалось, отчетливое проявление двух фракций с границей раздела в окрестности 0,8–1,0 мкм. Амплитуда распределения субмикронной фракции (рис. 2, *а*), имеющей унимодальную структуру, значительно превышает (на 1–2 порядка) амплитуду распределения грубодисперсной фракции. Имеющаяся спектральная информация не позволяет восстановить «г»-фракцию с высоким разрешением. Эта компонента представлена на рис. 2, *б* на интервале 1–5 мкм в виде гистограмм с шагом 1 мкм.

Наличие в восстановленных распределениях  $s(r)$  частиц двух диапазонов дисперсности обусловлено двумя различными механизмами образования морского аэрозоля в результате разрыва пузырьков воздуха на поверхности моря [11]. Относительный вклад «м»- и «г»- фракций в ослабление видимого и ИК-излучения соответствует априорным предположениям. Действительно, как показывают результаты обращения, даже при минимальной скорости ветра и соответственно минимальном воздействии ветрового режима на вынос в атмосферу солевых частиц вклад «м»-фракции в коэффициент ослабления  $\alpha(\lambda)$  в ближней ИК-области спектра не превышает 29% и убывает до 2,8% с ростом длины волны до 4,66 мкм, так что ослабление излучения в данном интервале длин волн определяется главным образом «г»-фракцией частиц. Несмотря на то, что вклад «г»-дисперсных частиц в суммарное геометрическое сечение относительно невелик (20–36%) (см. рис. 3, *а*), указанные частицы ответственны за значительную долю ослабления излучения также в видимой области спектра. Эта доля составляет 32% на левом краю спектрального интервала, возрастая до 62% при  $\lambda = 1,06$  мкм ( $v = 3$  м/с). Однако абсолютный вклад «г»- частиц в ослабление света в диапазоне 0,48–1,06 мкм приблизительно одинаков и для последнего примера, в частности, составляет  $0,112 \text{ км}^{-1}$ . Поэтому форма спектральной кривой  $\alpha(\lambda)$  в указанном диапазоне длин волн не зависит от «г»-фракции и определяется «м»-частицами.

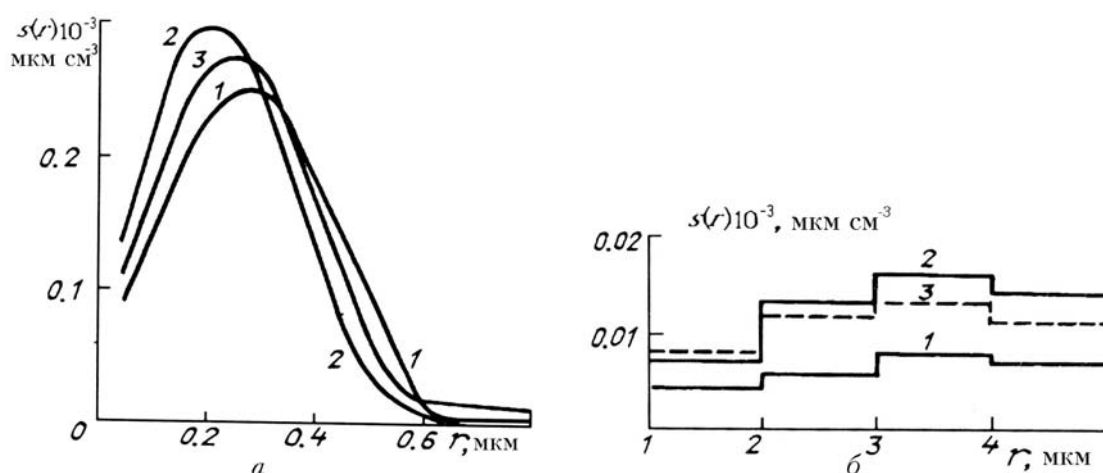


Рис. 2. Ветровая изменчивость микроструктуры дымки по результатам обращения экспериментальных данных, приведенных на рис. 1: кривая 1— $v = 1,4$  м/с; 2— $v = 3$  м/с; 3— $v = 4,7$  м/с; *а*) субмикронная фракция; *б*) грубодисперсная фракция

Из опубликованных данных [5–7] следует, что с ростом скорости ветра монотонно увеличивается концентрация частиц, в особенности крупных. Результаты полученные в настоящей работе, показывают, что влиянию скорости ветра подвержены в большей степени частицы «г»-диапазона. Так, например, если суммарное геометрическое сечение частиц  $S$  с увеличением скорости ветра от 1,4 до 4,7 м/с растет незначительно в пределах от 0,12 до 0,15 км<sup>-1</sup>, то относительный вклад «г»-фракции при этом изменяется от 20 до 36% ( $v = 3,0$  м/с), спадая до 32,5% при  $v = 4,7$  м/с (рис. 3, *а*). В то же время сечение частиц «м»-фракции сохраняется в узком интервале 0,097–0,1 км<sup>-1</sup>.

Таким образом, результаты обращения обнаруживают немонотонный характер изменения суммарного сечения частиц  $S$  от скорости ветра  $v$ , обусловленный в основном «г»-фракцией частиц, что приводит в конечном итоге к установленной в [4] немонотонной зависимости от скорости ветра спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в ИК-диапазоне.

Отмеченная связь микроструктурных параметров дымки со скоростью ветра в приводном слое атмосферы проявляется в более выраженной форме для функции распределения объема частиц по размерам. При изменении скорости ветра от 1,4 до 3 м/с объемный фактор заполнения  $V$  возрастает в 1,8 раза с  $1,42 \cdot 10^{-10}$  до  $2,5 \cdot 10^{-10}$ , а затем убывает до  $2,3 \cdot 10^{-10}$  при  $v = 4,7$  м/с (рис. 3, *б*). В отличие от геометрического сечения  $S$  основную долю объема частиц (и следовательно, их массы) составляют при этом частицы «г»-фракции (73,5–87,6%), которые играют определяющую роль в

формировании зависимости массовой концентрации частиц от скорости ветра. Для сравнения пунктирной линией на рис. 3, б изображена зависимость объемного содержания аэрозольных частиц, которая рассчитана по экспериментальным данным работы [5] для массовой концентрации хлоридов, измеренной при различных скоростях ветра со стороны моря (ст. Кацевели). В расчетах доля морских солей в общей массе прибрежного аэрозоля задавалась согласно экспериментальным данным [5] при плотности частиц, равной  $2,2 \text{ г/см}^3$ . Наблюдаемое на рис. 3, б соответствие данных, полученных при интерпретации оптических измерений и в результате обработки импакторных проб для прибрежной зоны Черного моря, можно считать вполне удовлетворительным, учитывая широкий диапазон вариаций зависимостей от скорости ветра содержания солевых частиц, полученных в акваториях других морей [5–6].

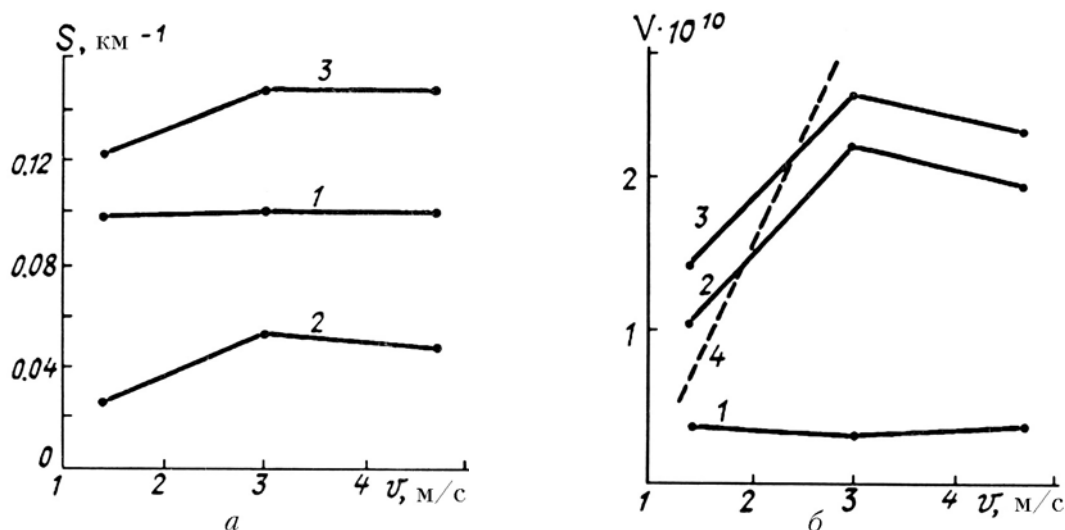


Рис. 3. Зависимость от скорости ветра геометрического сечения частиц  $S$  (а) и объемного фактора заполнения  $V$  (б): 1 – субмикронная фракция; 2 – грубодисперсная фракция; 3 – суммарное значение; 4 – результаты расчета по экспериментальным данным [5]

Наконец, следует отметить, что «г»-дисперсные частицы, имея определяющее значение в формировании немонотонной зависимости  $\alpha(\lambda)$  от скорости ветра, составляют при этом не более 1% от общего числа аэрозольных частиц. Их счетная концентрация составляет примерно 1 частицу в кубическом сантиметре при скорости ветра  $v = 1,4 \text{ м/с}$  и возрастает в 2,5 раза с увеличением  $v$  до  $4,7 \text{ м/с}$ .

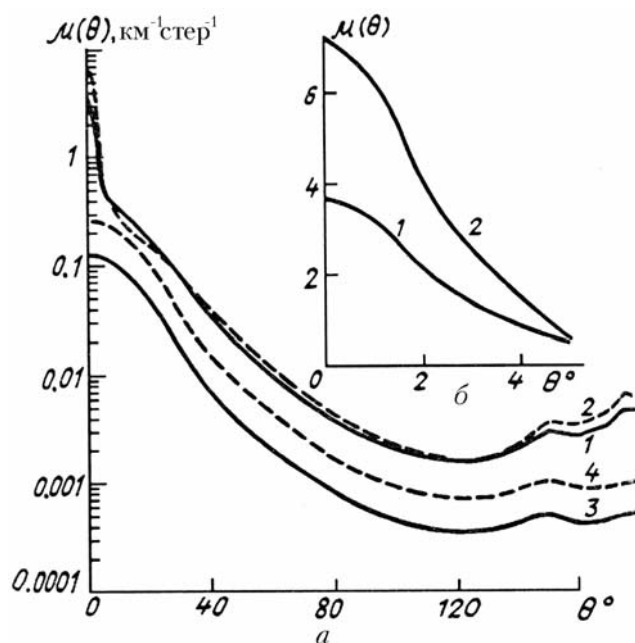


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния  $\mu(\theta)$ , рассчитанные по микроструктурным данным рис. 2 для  $v = 1,4 \text{ м/с}$  (кривые 1, 3) и  $3 \text{ м/с}$  (2, 4); кривые 1, 2 –  $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ ; 3, 4 –  $\lambda = 4,66 \text{ мкм}$

**4. Восстановление индикатрис рассеяния.** Вариации микрофизических параметров дымки под влиянием ветрового режима отражаются не только на изменчивости спектрального ослабления, но также и на угловых характеристиках светорассеяния, которые могут быть определены по восстановленной микроструктуре аэрозоля. Для примера на рис. 4 представлены угловые зависимости индикатрис рассеяния  $\mu(\theta)$ , рассчитанные по микроструктурным данным, приведенным на рис. 2, для двух значений скорости ветра  $v = 1, 4$  м/с (кривые 1, 3) и 3,0 м/с (кривые 2, 4). Индикатрисы 1, 2 восстановлены для длины волны  $\lambda = 0,55$ , а 3, 4 — для  $\lambda = 4,66$  мкм. Для индикатрис рассеяния видимого диапазона характерно наличие узкого пика в области малых углов рассеяния ( $\theta < 5^\circ$ , рис. 4, б, кривые 1, 2). Из сравнения приведенных на рис. 4 данных видно, что в видимой области спектра индикатрисы рассеяния подвержены ветровому воздействию для узкой области углов рассеяния в направлении вперед, а также в задней полусфере. Наиболее чувствительна к изменению скорости ветра малоугловая часть индикатрисы рассеяния (рис. 4, б), где ее величина определяется «г»-фракцией аэрозольных частиц. В остальной области углов рассеяния вариации индикатрис слабо зависят от скорости ветра и для интервала углов  $5-150^\circ$  не превышают 13–17%. При переходе к ИК-области индикатриса рассеяния становится менее вытянутой и смещается на графике с ростом скорости ветра от 1,4 до 3,0 м/с примерно на одинаковую величину, которая соответствует ее возрастанию приблизительно в два раза на всем интервале углов рассеяния (кривые 3, 4).

**5. Заключение.** Таким образом, методом обратной задачи для спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления света в работе получены количественные данные о микроструктуре дымки прибрежного района Черного моря и трансформации ее субмикронной и грубодисперсной фракций в зависимости от скорости ветра. Установлено, что скорость ветра оказывает наибольшее влияние на содержание частиц грубодисперсной фракции, составляющих для условий наблюдения 74–88% от общей массы аэрозольных частиц. Представленные результаты подтверждают высказанную в [4] гипотезу о роли грубодисперсного аэрозоля в формировании немонотонной зависимости от скорости ветра коэффициента аэрозольного ослабления излучения в ИК-области спектра. Восстановленные по микроструктурным данным угловые зависимости характеристик светорассеяния свидетельствуют о значительном влиянии ветрового режима на вариации малоугловой части индикатрисы рассеяния в видимой области спектра. Полученные результаты могут быть использованы при учете изменчивости оптико-микрофизических моделей дымки морского происхождения под влиянием ветрового режима.

1. Веретенников В. В., Кабанов М. В., Панченко М. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1042–1049.
2. Веретенников В. В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 10. С. 1026–1033.
3. Горчаков Г. И., Емиленко А. С., Свириденков М. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
4. Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н., Щелканов Н. Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 3. С. 324–327.
5. Петренчук О. П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 264 с.
6. Tsunogai S., Saito O., Ymada K., Nakaya S. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 27. P. 5283–5292.
7. Wells W. C., Gal G., Munn M. W. // Appl. Opt. 1977. V. 16. № 3. P. 654–659.
8. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок / М. В. Кабанов, М. В. Панченко, Ю. А. Пхалагов и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
9. Зуев В. Е., Наац И. Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
10. Танаана В. П. Методы решения операторных уравнений. М.: Наука, 1981. 156 с.
11. Химия нижней атмосферы / Под ред. С. Расула. М.: Мир, 1976. 408 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
8 января 1991 г.

V. V. Veretennikov. **On the Effect of Wind on the Optical-Microphysical Parameters of Coastal Aerosol.**

The paper deals with the technique and results of interpretation of data on spectral behaviors aerosol extinction coefficients in the atmosphere of a coastal region aimed at restitution of quantitative information on the haze microstructure and its transformations by wind velocity variations. The results of the inverse problem solution provided the possibility of analyzing the effect of wind speed variations on the contents at particles of the fine and coarse fractions in the aerosol ensemble. Also the aerosol scattering phase functions in the visible and IR regions are restituted for different values of the wind velocity. The results obtained in this paper can be useful when solving the problems where it is necessary to account for the changes of optical-microphysical properties of the aerosol to wind speed variations.