

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

В.В. Веретенников

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МОДЕЛИ СПЕКТРАЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ДЫМКИ МОРСКОГО ПРИБРЕЖНОГО РАЙОНА

Представлены результаты интерпретации спектральной однопараметрической модели коэффициента ослабления излучения дымки морского прибрежного района. Рассмотрены методические вопросы решения соответствующей обратной задачи. Выявлены общие закономерности изменения микроструктурных параметров прибрежных дымок в зависимости от степени замутнения атмосферы. Установлено наличие субмикронной и грубодисперсной фракций дымки и получена оценка их значимости в ослаблении видимого и ИК-излучения.

1. Введение

Наиболее полные и всесторонние сведения по оптическим характеристикам дымки морского прибрежного района, их изменчивости под влиянием комплекса геофизических факторов приведены в монографии [1]. В результате интерпретации угловых зависимостей поляризационных индикатрис рассеяния морской прибрежной дымки на длине волны $\lambda = 0,546$ мкм в [2] получены данные о микроструктуре и показателе преломления субмикронной фракции дымки с размерами частиц, не превышающими 0,8 мкм по радиусу. По микроструктурным данным методом микрофизической экстраполяции в спектральном интервале 0,44–0,84 мкм был восстановлен полный набор энергетических и поляризационных характеристик дымки. При этом была отмечена неприменимость экстраполяции на область $\lambda > 0,84$ мкм вследствие ограниченной информативности экспериментального материала относительно грубодисперсной фракции частиц ($r > 0,8 - 1,0$ мкм).

Наряду с угловыми поляризационными характеристиками прибрежной дымки в [1] значительное внимание уделено анализу аэрозольного ослабления оптического излучения в диапазоне длин волн 0,48–11,9 мкм. Естественно ожидать, что интерпретация спектральных зависимостей коэффициента ослабления дымки обеспечит дополнительную информацию о ее грубодисперсной фракции и создаст предпосылки для расширения спектрального диапазона микрофизической экстраполяции.

По аналогии с [2] в данной статье объектом интерпретации были выбраны не отдельные экспериментальные реализации, а усредненная статистическая модель спектрального хода коэффициента аэрозольного ослабления излучения [1], записываемая в виде

$$\sigma(\lambda) = k_0(\lambda) + k_1(\lambda) \cdot \sigma(0,55), \quad (1)$$

где $\sigma(\lambda)$ – коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны λ ; $\sigma(0,55)$ – коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, представляющий собой входной параметр модели; $k_0(\lambda)$, $k_1(\lambda)$ – некоторые эмпирические коэффициенты. Регрессионная модель (1) получена Ю.А. Пхалаговым и В.Н. Ужеговым на основе анализа многолетних базовых измерений спектральной прозрачности атмосферы в прибрежной зоне Черного моря и описывает изменчивость спектрального хода коэффициента ослабления излучения дымки в зависимости от степени замутнения атмосферы. Данная модель построена в результате статистического анализа около 1 тыс. спектров, полученных в течение 6 сезонов на трех трассах в различных точках побережья Черного моря. Модель позволяет оценивать значения коэффициента аэрозольного ослабления для ряда длин волн λ_i из интервала 0,48–11,9 мкм по его значению, заданному на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм. Аналогичные статистические модели с таким же входным параметром $\sigma(0,55)$ были разработаны ранее для компонент матрицы рассеяния континентальной дымки [3] и для поляризационных индикатрис рассеяния дымки прибрежного района [4].

В предлагаемой статье дана интерпретация однопараметрической модели (1) на основе решения обратной задачи в спектральном интервале 0,55–3,9 мкм для оценки микроструктурных параметров дымки, оптические проявления которой были бы адекватны модели (1). Решение этой задачи позволяет установить закономерности трансформации дисперсного состава дымки, сопровождающей изменение степени замутнения атмосферы, и на этой основе расширить информационную базу для построения микроструктурной модели дымки прибрежного района.

2. Методика решения обратной задачи

Математическая постановка задачи обращения спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления излучения подробно обсуждается в [5] и состоит в решении интегрального уравнения

$$\int_0^R K(\lambda, r) s(r) dr = \sigma(\lambda), \quad (2)$$

в котором $s(r)$ – искомая функция распределения по размерам геометрического сечения частиц; r – радиус частиц; $K(\lambda, r)$ – фактор эффективности ослабления излучения, зависящий от комплексного показателя преломления $m - i \cdot \kappa$, а правая часть $\sigma(\lambda)$ задается согласно модели (1). Неопределенными параметрами в уравнении (2) являются показатель преломления $m - i \cdot \kappa$ и верхняя граница размеров R . Поскольку методические вопросы обращения уравнения вида (2) неоднократно рассматривались в литературе, ограничимся здесь лишь краткой характеристикой использованного метода, останавливаясь на деталях по мере необходимости.

Для обращения уравнения (2) был применен регуляризирующий алгоритм, разработанный на основе метода А.Н. Тихонова и использованный ранее при интерпретации угловых поляризационных измерений [6]. Вектор приближенного решения s находился из обращения эквивалентной (2) регуляризованной системы линейных алгебраических уравнений:

$$(K^* K + \alpha D) s_\alpha = K^* \sigma, \quad (3)$$

в которой K^* – матрица, сопряженная матрице K ; D – сглаживающая матрица; α – параметр регуляризации.

2.1. Оценка m и κ . При вычислении ядра $K(\lambda, r)$ изменчивость спектрального хода $m(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$ для различных значений дальности видимости S_m определялась из ранее полученных результатов интерпретации однопараметрической модели поляризационных индикатрис рассеяния рассматриваемой дымки в видимом диапазоне ($\lambda = 0,55$ мкм) [2]. В [2] получены оценки $m(0,55)$ и $\kappa(0,55)$, а также данные о величине объемных факторов заполнения двух фракций: «сухого вещества» – V_d и воды V_w и их изменчивости для различных значений метеорологической дальности видимости S_m . В частности, величина m монотонно возрастает от 1,38 до 1,44 при изменении S_m от 5 до 50 км. Это связано с возрастанием относительной доли «сухого вещества» с 30 ($S_m = 5$ км) до 70% ($S_m = 50$ км). На основе полученных данных о соотношении объемных факторов заполнения V_d и V_w при различной дальности видимости S_m были рассчитаны по формуле удельной рефракции спектральные зависимости $m(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$. При этом данные о спектральном ходе показателя преломления каждой фракции были взяты из [7]. Результаты расчета $m(\lambda)$ представлены в таблице. Мнимая часть показателя преломления $\kappa(\lambda)$ принимает в спектральном диапазоне 0,55–3,9 мкм невысокие значения, не превышающие 0,005 при $S_m = 5$ км и 0,01 при $S_m = 50$ км.

Спектральная зависимость вещественной части показателя преломления m при различной дальности видимости S_m

λ , мкм	S_m , км				
	5	10	20	30	50
0,55	1,38	1,39	1,41	1,43	1,44
0,69	1,38	1,39	1,41	1,43	1,44
1,06	1,37	1,39	1,40	1,42	1,43
1,2	1,37	1,38	1,40	1,415	1,425
1,6	1,355	1,365	1,38	1,39	1,40
2,2	1,32	1,32	1,33	1,34	1,34
3,9	1,375	1,375	1,38	1,385	1,39

2.2. Оценка R . Априорный выбор верхнего предела интегрирования в (2) основывался на модификации методики, предложенной в [5]. Нижняя граница оценки максимального размера частиц R^* находилась итерационным способом по схеме:

$$(R_n^*)^{-1} \int_0^{R_n^*} K(\lambda, r) dr = \sigma(\lambda)/S_{n-1}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$S_n = \int_0^{R_n^*} s_n(r) dr,$$

где $s_n(r)$ — распределение, восстановленное при обращении уравнения (2) с верхним пределом $R = R_n^*$; S — суммарное геометрическое сечение аэрозольных частиц в единичном объеме; n — номер итерации. Данная методика требует задания начального значения S_0 . В рассматриваемом случае начальное значение S_0 оценивалось из результатов решения обратной задачи для поляризационных индикатрис [2]. Например, для метеорологической дальности видимости 5 км начальное значение $S_0 = 0,37 \text{ км}^{-1}$. Решение уравнения (4) для $\lambda = 3,9 \text{ мкм}$ дает величину $R_1^* = 1,7 \text{ мкм}$. Для распределения $s_1(r)$, восстановленного при обращении уравнения (2) с верхним пределом $R = R_1^*$, новое значение $S_1 = 0,28 \text{ км}^{-1}$. В свою очередь, следующая итерация (4) для $S = S_1$ дает новую оценку $R_2^* = 1,9 \text{ мкм}$. Практически при таком подходе достаточно двух итераций, чтобы получить малолучшаемую в дальнейшем оценку нижней границы значений R^* . Это связано с тем, что вариации априорного задания R в широких пределах слабо отражаются на изменчивости суммарного сечения S восстанавливаемых микроструктурных распределений. Так, например, при расширении границы области определения функции $s(r)$ до $R = 4,3 \text{ мкм}$, т. е. примерно в два раза, величина S почти не изменяется и равняется $0,3 \text{ км}^{-1}$. Применение данной методики к оценке R^* при дальности видимости S_m в интервале 5–50 км дает близкие между собой результаты в диапазоне $1,9–2,3 \text{ км}^{-1}$.

Другой вариант оценки R^* основан на априорном задании полидисперсного фактора эффективности ослабления $\bar{K}_m = \sigma_{\max}/S$ в точке экстремума спектральной зависимости $\sigma(\lambda)$ [5]. В этом случае уравнение для оценки R^* приобретает вид

$$(R^*)^{-1} \int_0^{R^*} K(\lambda_{\max}, r) dr = \bar{K}_m \sigma(\lambda_{\max})/\sigma_{\max}. \quad (5)$$

Диапазон изменчивости значений \bar{K}_m для широкого класса атмосферных дымок типа H , L , и M согласно [5] оценивается в пределах 2,6–3,3. Для рассматриваемой модели (1) максимум на спектральном ходе $\sigma(\lambda)$ наблюдается только при высокой прозрачности атмосферы и для $S_m = 50 \text{ км}$ достигается в точке $\lambda = 0,69 \text{ мкм}$. С учетом диапазона изменчивости фактора \bar{K}_m оценка R^* по формуле (5) дает величину в пределах 2,2–2,55 мкм, что хорошо согласуется с ранее полученными результатами.

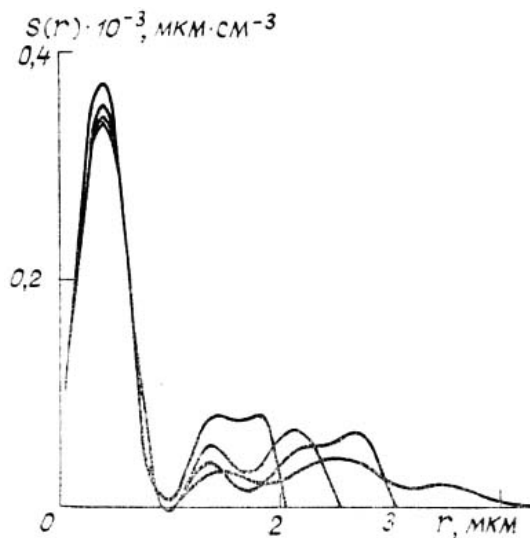


Рис. 1. Результаты обращения спектральной модели коэффициента аэрозольного ослабления $\sigma(\lambda)$ для $S_m = 5 \text{ км}$ при различном выборе верхней границы размеров R

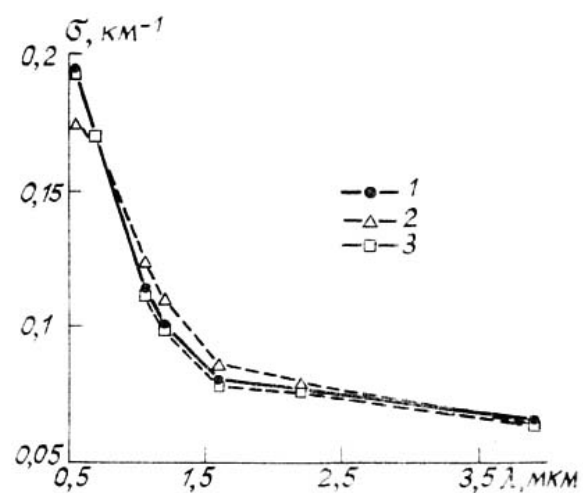


Рис. 2. Спектральный ход коэффициента аэрозольного ослабления излучения $\sigma(\lambda)$ для $S_m = 20 \text{ км}$: 1 — модель; 2, 3 — результаты расчета $\sigma(\lambda)$ по микроструктуре $s(r)$, восстановленной без коррекции субмикронной фракции частиц дымки (2) и с ее коррекцией (3)

Семейство решений $s(r)$, восстановленных по спектральной зависимости $\sigma(\lambda)$ (1), соответствующей $S_m = 5$ км, для возрастающей последовательности значений R изображено на рис. 1. Исходное значение R равно 2,05 мкм. Дальнейшая коррекция R в сторону возрастания осуществлялась таким образом, чтобы суммарный вклад в оптические характеристики частиц с размерами, большими R , был пренебрежимо мал. Из рис. 1 видно, что при $R = 3$ мкм наблюдается спад $S(r)$ к нулю, что дает основание окончательно установить верхнюю границу диапазона дисперсности исследуемой дымки на уровне $R = 4,3$ мкм. Анализ решений, приведенных на рис. 1, показывает, что увеличение R не отражается в характере распределения частиц с размерами меньше 0,9 мкм, в то время как грубодисперсная фракция «расплывается» по все более широкому интервалу с соответствующим понижением среднего уровня. Интересно отметить, что все распределения $s(r)$ при стабильности суммарного сечения $S \approx 0,28 - 0,3$ км⁻¹ соответствуют модели (1) по оптическому проявлению с примерно одинаковой погрешностью (7–8,5%).

2.3. Выбор параметра α . При построении регуляризованного решения уравнения (2) величина параметра регуляризации α должна быть согласована с погрешностью исходных данных. Однако в случае, когда правая часть (2) задается некоторой моделью вида (1), возникают трудности, связанные с корректной оценкой погрешности модели (1). В этих условиях более эффективным оказывается использование критериев выбора α , не зависящих в явном виде от ошибок исходных данных. В качестве таких способов были рассмотрены выбор по критерию квазиоптимального значения параметра регуляризации $\alpha_{кв}$ [8], а также на основе принципа минимальных невязок $\alpha_{м.н}$ [9]. В последнем случае значение $\alpha_{м.н}$ определялось из условия минимума функционала

$$\rho = \|Ks_\alpha - \sigma\| + \|KPs_\alpha - \sigma\|,$$

в котором P — оператор проектирования на множество неотрицательных функций:

$$Ps_\alpha(r) = \begin{cases} s_\alpha(r), & s_\alpha(r) \geq 0, \\ 0, & s_\alpha(r) < 0. \end{cases}$$

В рассматриваемой задаче указанные критерии дают близкие между собой значения α , причем $\alpha_{м.н} < \alpha_{кв}$, а невязка составляет 5–8%.

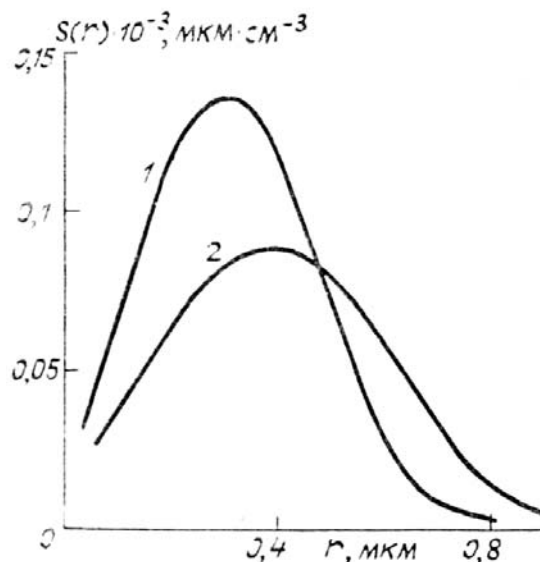


Рис. 3. Распределения мелкодисперсной фракции частиц дымки до (кривая 2) и после коррекции (1), восстановленные при обращении модели $\sigma(\lambda)$ для $S_m = 20$ км

2.4. Коррекция мелкодисперсной фракции. Вследствие приближенного характера решения обратной задачи значение коэффициента ослабления $\sigma(\lambda)$, рассчитанного по восстановленной микроструктуре $s_\alpha(r)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, отличается от величины $\sigma(0,55)$ — входного параметра оптической модели (1). Для примера на рис. 2 изображены спектральные зависимости $\sigma(\lambda)$, соответствующие модели (1) для $S_m = 20$ км (кривая 1) и результаты расчета $\sigma = Ks_\alpha$ (кривая 2), расхождение между которыми в точке $\lambda = 0,55$ мкм составляет около 10%. При этом возникает ситуация, при которой аэрозольное распределение $s_\alpha(r)$, восстановленное из оптической модели (1) при одной дальности видимости, в действительности обеспечивает другую дальность видимости, от-

личную от модельной. Поэтому можно вести речь лишь о приближенном соответствии между входным параметром оптической модели (1) и ее микроструктурным образом. Возникает необходимость коррекции решения $s_a(r)$ с целью компенсации указанного расхождения в оптических характеристиках. Следует отметить, что компенсация коэффициента ослабления излучения в коротковолновой области без заметного искажения в остальных участках спектра возможна лишь за счет коррекции мелкодисперсной фракции аэрозоля. Исключая из суммарного ослабления $\sigma(\lambda)$ вклад ослабления $\sigma_r(\lambda)$, обусловленного грубодисперсной фракцией ($r \geq 1$ мкм) и имеющего в области 1,2 мкм нейтральный ход, получим спектральную зависимость коэффициента ослабления $\sigma_m(\lambda) = (\sigma(\lambda) - \sigma_r(\lambda))$ субмикронной фракции дымки. Из решения обратной задачи для $\sigma_m(\lambda)$ определяется скорректированное распределение по размерам мелкодисперсной фракции $s_m(r)$. На рис. 3 изображены распределения мелкодисперсной фракции частиц $s_m(r)$ до (кривая 2) и после коррекции (кривая 1), восстановленные по исходным данным, приведенным на рис. 2. Спектральный ход $\sigma(\lambda)$, соответствующий скорректированной микроструктуре, изображен на рис. 2 (кривая 3). В рассмотренном примере невязка при $\lambda = 0,55$ мкм в результате коррекции уменьшилась с 10 до 0,8%.

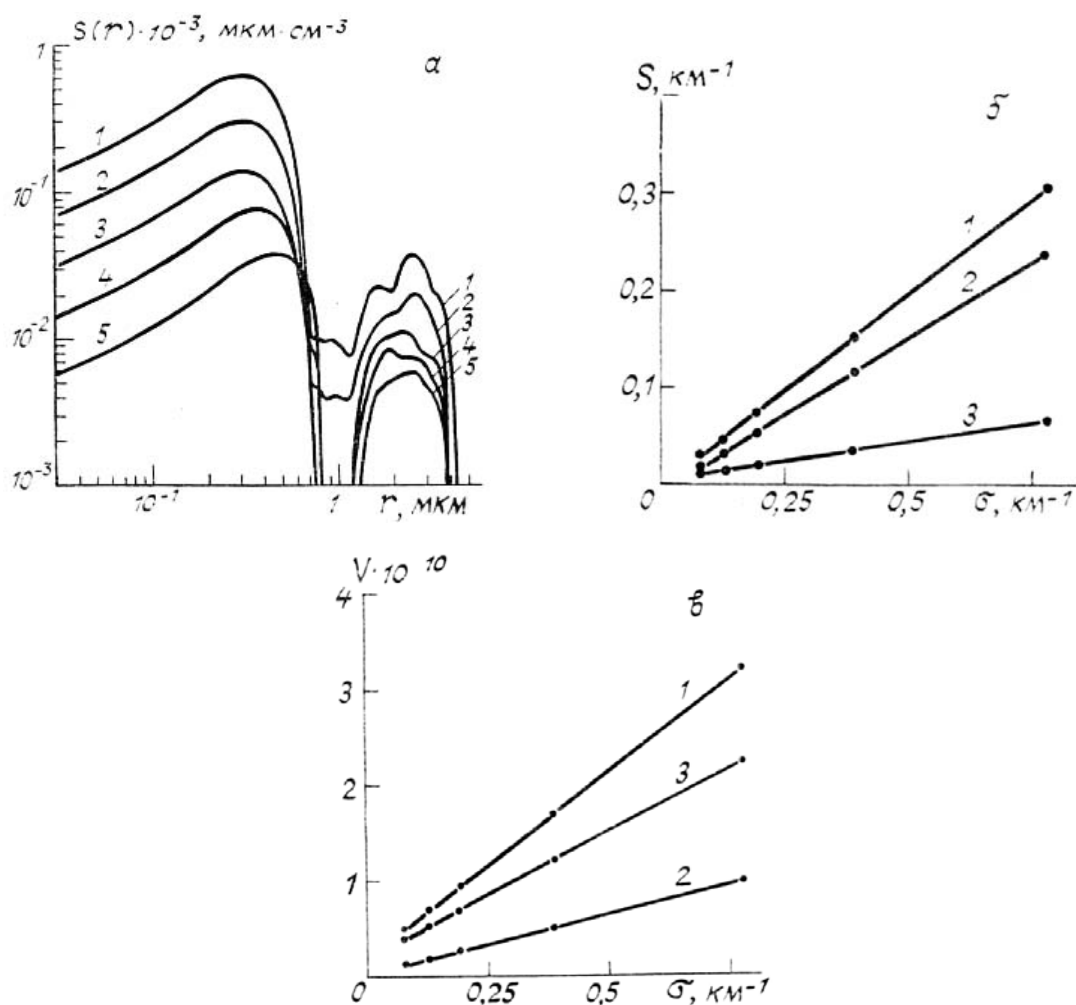


Рис. 4. Результаты обращения спектральной модели ослабления $\sigma(\lambda)$ дымки прибрежного района: а — функции распределения геометрического сечения по размерам $s(r)$, восстановленные по модели $\sigma(\lambda)$ при дальности видимости $S_m = 5$ (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4) и 50 (5) км; б — зависимость от коэффициента аэрозольного ослабления $\sigma(0,55)$ суммарного геометрического сечения частиц S (1) с разделением на субмикронную (2) и грубодисперсную (3) фракции; в — зависимость от коэффициента аэрозольного ослабления $\sigma(0,55)$ объемного фактора заполнения V (1) с разделением на субмикронную (2) и грубодисперсную (3) фракции

3. Результаты обращения

Окончательные результаты обращения спектральных зависимостей коэффициента аэрозольного ослабления при изменении дальности видимости S_m от 5 до 50 км представлены на рис. 4, а. Из рис. 4, а видно отчетливое проявление минимума в окрестности точки $r \approx 0,9 - 1,0$ мкм во всех восстановленных распределениях, обуславливающего возможность разделения всего диапазона размеров

на две области, соответствующие мелкодисперсной ($r \leq 1$ мкм) и грубодисперсной ($r > 1$ мкм) фракциям частиц. Кривые 1–5 на рис. 4, а описывают микроструктуру дымки при значениях метеорологической дальности видимости $S_m = 5, 10, 20, 30$ и 50 км соответственно. На рис. 4, б показано изменение интегральных параметров микроструктуры: геометрического сечения частиц S мелкодисперсной и грубодисперсной фракций (кривые 2, 3), а также их суммарной величины (кривая 1), в зависимости от коэффициента аэрозольного ослабления на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм. Зависимости, представленные на рис. 4, б, хорошо аппроксимируются линейными возрастающими функциями. При десятикратном изменении замутненности атмосферы величина суммарного сечения возрастает в пределах от $0,03 \text{ км}^{-1}$ ($S_m = 50$ км) до $0,3 \text{ км}^{-1}$ ($S_m = 5$ км), т. е. также в 10 раз. Причем основной вклад в сечение вносит мелкодисперсная фракция. Ее относительная доля также возрастает от 63 ($S_m = 50$ км) до 78% ($S_m = 5$ км) с ростом замутненности атмосферы.

Если перейти к рассмотрению объемного содержания частиц дымки, характеризуемого удельным фактором заполнения V , то относительная роль мелко- и грубодисперсной фракций меняется (см. рис. 4, в, кривые 2, 3). В этом случае, наоборот, основной вклад вносит грубодисперсная фракция, которая составляет около 78% от общего объема при максимальной прозрачности атмосферы ($S_m = 50$ км). С ростом замутненности атмосферы относительное содержание частиц грубодисперсной фракции незначительно снижается по объему до 69% при $S_m = 5$ км. Суммарный фактор заполнения (рис. 4, в, кривая 1) составляет $3,2 \cdot 10^{-10}$ при максимальной замутненности атмосферы ($S_m = 5$ км) и монотонно снижается примерно в 7 раз при росте дальности видимости S_m до 50 км. Отметим также, что для мелкодисперсной фракции дымки средний по распределению $s(r)$ радиус ($r_s = (3/4) \cdot (V/S)$) частиц уменьшается от 0,42 до 0,31 мкм.

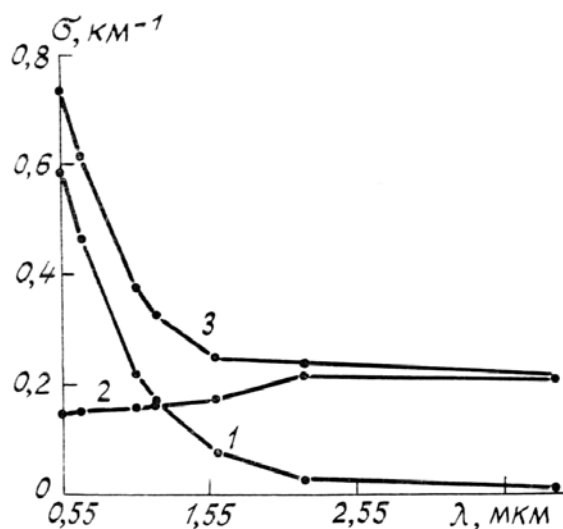


Рис. 5. Спектральное ослабление излучения субмикронной (1) и грубодисперсной (2) фракциями частиц дымки для однопараметрической модели $\sigma(\lambda)$ (3) при $S_m = 5$ км

Наконец, последняя микроструктурная характеристика, которая представляет интерес, это счетная концентрация частиц. Для рассматриваемой дымки основную долю общей концентрации частиц N (более 99%) составляют частицы мелкодисперсной фракции. Число частиц в 1 см^3 с радиусом, большим 0,09 мкм, монотонно возрастает от ~ 70 ($S_m = 50$ км) до 1300 ($S_m = 5$ км). Таким образом, в зависимости от выбранной микроструктурной характеристики дымки (S , V или N) меняется относительная значимость ее двух фракций: субмикронной и грубодисперсной. Представляет интерес оценка вклада каждой фракции в ослабление оптического излучения. На рис. 5 представлены результаты расчета спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления для мелкодисперсной (кривая 1) и грубодисперсной (кривая 2) фракций морских прибрежных дымок для метеорологической дальности видимости $S_m = 5$ км. Картина качественно не меняется с ростом S_m . Как и следовало ожидать, грубодисперсная фракция дымки определяет составляющую в суммарном ослаблении с практически нейтральным спектральным ходом в видимой области спектра, где на ее долю приходится не менее 20%. Вклад грубодисперсной фракции в ослабление излучения растет с увеличением длины волны λ и становится преобладающим для $\lambda \geq 2,2$ мкм (90% и более). Примечательно, что при высоких прозрачностях атмосферы относительная роль грубодисперсного аэрозоля в ослаблении излучения возрастает и его вклад в суммарном коэффициенте ослабления составляет не менее 31% (при $S_m = 50$ км).

4. Заключение

Представленные в статье результаты обращения однопараметрической модели коэффициента ослабления излучения морской прибрежной дымки, заданной в спектральной области 0,55–3,9 мкм, описывают микроструктуру аэрозольных распределений с размерами частиц в интервале до 4,3 мкм. Методом решения обратной задачи в восстановленных микроструктурных распределениях дымки установлено наличие двух фракций: субмикронной ($r \leq 0,8 - 1,0$ мкм) и грубодисперсной ($r \geq 1,0$ мкм), что согласуется с современными представлениями о полимодальной структуре атмосферных аэрозолей. Средний вклад в суммарное геометрическое сечение частиц мелкодисперсной фракции дымки составляет около 70% с отклонением в пределах 7% при изменении дальности видимости от 5 до 50 км. Приведены оценки вклада каждой фракции в спектральное ослабление излучения в интервале 0,55–3,9 мкм. Полученная количественная информация о дисперсном составе дымки морского прибрежного района позволяет рассчитать различные характеристики светорассеяния дымки в видимом и ИК-диапазоне такие, например, как лидарное отношение, матрица рассеяния, представляющие интерес для задач лазерного зондирования и в других областях атмосферной оптики.

1. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок /Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
2. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1042–1049.
3. Горчаков Г.П., Емиленко А.С., Свириденков М.А. //Изв. АН СССР* Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
4. Панченко М.В., Фадеев В.Я. //VI Всесоюз. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: ТФ СО АН СССР, 1981. С. 71–75.
5. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
6. Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.Я. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. № 12. С. 1313–1317.
7. Nilsson B. //Appl. Opt. 1979. V. 18. № 20. P. 3457–3473.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 286 с.
9. Танана В.П. Методы решения операторных уравнений. М.: Наука, 1981. 156 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
19 июня 1990 г.

V. V. Veretennikov. Interpretation of the Model for Spectral Extinction of Radiation by a Haze in the Sea Coastal Region.

The paper presents some results of the interpretation of the single parameter spectral model of the radiation extinction coefficient for a haze in the sea coastal region. Some aspects of solving corresponding inverse problem are discussed. Certain common features in the evolution of microstructure parameters of the coastal hazes at the changes of the atmospheric turbidity are revealed. It is found in the paper that the haze is composed of a submicron and coarse fractions and contributions of these fractions into the extinction of visible and IR radiation are estimated.