

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 551.510.42:535.521.3]:551.46

## ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД МОРЕМ

© 2012 г. А. М. Кокорин, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский филиал института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: kokam43@yandex.ru

В приближении полидисперсного ансамбля (просветленных, двухслойных и однородных сфер) теоретически анализируется влияние внутренней структуры (как результат изменения влажности воздуха) на коэффициент поглощения и альbedo однократного рассеяния света ансамбля малых гигроскопичных, неоднородных и поглощающих частиц сульфатной составляющей морского аэрозоля в пограничном слое атмосферы. В инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах волн исследуются вариации этих оптических характеристик аэрозолей, вызванные изменениями микроструктурных параметров аэрозольных частиц. Показано, что учет радиальной неоднородности структуры аэрозольных частиц может привести к большим погрешностям при оценке коэффициента поглощения и, следовательно, к большим погрешностям при расчете радиационного и термического режимов пограничного слоя атмосферы.

*Ключевые слова:* аэрозоль, просветленные, двухслойные, однородные частицы, пограничный слой, атмосфера.

Коды OCIS: 290.1090.

Поступила в редакцию 23.04.2012.

### Введение

Аэрозоль в пограничном слое над океаном, как элемент климатической системы, играет важную роль, непосредственно воздействуя на условия переноса радиации в атмосфере. Количество приходящей и уходящей солнечной радиации зависит от состава атмосферы и прежде всего от наличия аэрозолей, которые поглощают и рассеивают коротковолновую и длинноволновую солнечную радиацию, уменьшая или увеличивая тем самым поток излучения, приходящего на подстилающую поверхность [1].

Оптические свойства морских аэрозолей определяются физико-химическими характеристиками частиц, генерируемых морской поверхностью, а также частицами, приносимыми в атмосферу над океаном из суши. К числу важных микроструктурных характеристик частиц морского аэрозоля, обуславливающих формирование поля рассеянной и поглощенной

радиации, относится внутренняя структура (ВС) рассеивающих частиц [2–5].

Наиболее важным параметром, определяющих ВС частиц морского аэрозоля, является влажность атмосферы. Процесс изменения микрофизических свойств частиц аэрозоля в поле переменной влажности начинается с заполнения микрокапилляров и неровностей поверхности частиц, затем происходит растворение ядер конденсации и, при достаточно высоком уровне влажности, – обволакивание частиц оболочкой водного раствора [2–4]. При этом увеличиваются внешние размеры частиц  $r_2$ , уменьшаются размеры ядер до некоторого значения  $r_1$  и изменяется показатель преломления растворной оболочки. Вследствие увлажнения и частичного растворения аэрозольных частиц отклонение их формы от сферической будет проявляться в значительно меньшей степени. В этих условиях могут образовываться однородные, двухслойные частицы и частицы с плавным

изменением показателя преломления от поверхности к ядру конденсации. В связи с этим в атмосферной оптике во многих исследованиях приобрел распространение подход, основанный на использовании моделей концентрических сфер. Например, модель двухслойной сферы (ДС) – ядро плюс воднорастворимая оболочка [2–5], трехслойные – нерастворимое ядро, неполностью растворенная солевая оболочка и водный раствор [6], сферические частицы с плавной радиальной неоднородностью показателя преломления от центра до поверхности частицы [2]. Расчеты, проведенные на этих моделях, показали необходимость учета ВС и позволили в целом ряде практических случаев в первом приближении оценить влияние неоднородной структуры аэрозольных частиц на их характеристики светорассеяния.

В процессе образования и роста аэрозолей в пограничном слое над океаном часто встречаются двухслойные частицы с плавной радиальной неоднородностью показателя преломления – например, ядра конденсации в стадии обводнения [7–10]. Такие частицы аэрозоля во многом соответствуют модели просветленной сферы (ПС), представляющей собой двухслойную сферическую частицу, внутренняя часть которой является однородным ядром с комплексным показателем преломления  $n_0$ , а наружная – неоднородным сферическим слоем, показатель преломления в котором непрерывно меняется от  $n_0$  до  $n_2$ . Профиль комплексного показателя преломления сухого аэрозольного вещества и оболочки частицы показан на рис. 1 (1).

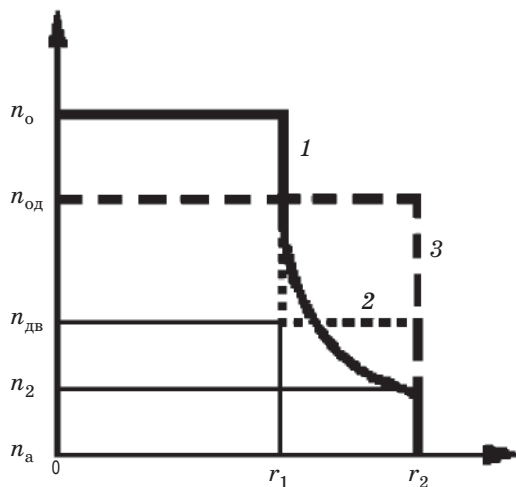


Рис. 1. Профиль показателя преломления моделей ПС (1), ДС (2) и ОС (3). Пояснения в тексте.

Оптическая структура ПС определяется зависимостью комплексного показателя преломления  $n$  от параметра  $\rho$ :

$$n_{\text{пр}}(\rho) = \begin{cases} n_0 > 0, & 0 \leq \rho \leq \rho_1, \\ n_3 C \rho^k, & \rho_1 < \rho < \rho_2, \\ n_2, & \rho = \rho_2, \\ n_3, & \rho > \rho_2. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \rho &= kr, \quad k = 2\pi\lambda^{-1}, \quad \rho_2 = kr_2, \\ \rho_1 &= kr_1, \quad h = \rho_2/\rho_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от центра частицы,  $\lambda$  – длина волны излучения во внешней среде,  $r_1$  и  $r_2$  – соответственно радиус ядра и оболочки,  $n_0 = m_0 - i\chi_0$  – комплексный показатель преломления сухого вещества ядра, а  $C$  и  $k$  – константы. В дальнейшем примем показатель преломления внешней среды  $n_3 = 1$ . Для поглощающих частиц такой оптической структуры, используя результаты работы [12], мы получили алгоритм решения задачи дифракции света на таких частицах, который в дальнейшем использовали в численном эксперименте.

Частицы ПС, по сравнению с ДС (профиль 2 на рис. 1), существенно меньше отражают свет на границе переходного слоя ядро–оболочка. Это обстоятельство, как мы покажем ниже, кардинально меняет картину рассеянного поля – оболочка фокусирует поток энергии, проникающей внутрь частицы, на поглощающее ядро, повышая тем самым эффективность его поглощения, что приводит к значительному увеличению сечения поглощения частиц ПС. Как будет показано далее, такая особенность структуры ПС существенным образом влияет на коэффициенты поглощения ( $K_{\text{п}}$ ), ослабления ( $K_0$ ) и альbedo однократного рассеяния ( $w_0$ ) полидисперсного ансамбля ПС в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра, и как следствие этого – в целом на общую картину поглощения и рассеяния солнечной радиации в пограничном слое атмосферы над океаном. Отметим, что вопрос о поведении этих интегральных характеристик светорассеяния (ИХС) также важен для многих задач оптики атмосферы и некоторых технических приложений.

В связи с этим представляется интересным оценить влияние внутренней структуры (1) на характеристики  $K_{\text{п}}$ ,  $K_0$  и  $w_0$  наиболее оптически активного сульфатного компонента

морского аэрозоля в поле переменной влажности. Подобные исследования для реальных поглощающих частиц морского аэрозоля в приближении полидисперсных систем ПС, насколько нам известно, ранее никем не проводились.

В настоящей работе, которая является продолжением исследований, начатых в 1997 г. [8–11], представлены результаты модельного эксперимента по оценке влияния относительной влажности воздуха на ИХС ансамбля малых слоисто-неоднородных частиц морского аэрозоля в пограничном слое атмосферы над морем в приближении моделей полидисперсного ансамбля (просветленных, двухслойных и однородных) сферических частиц.

Примем ряд предположений, упрощающих проведение анализа. Будем рассматривать три наиболее типичных механизма обводнения аэрозольных частиц во влажной атмосфере:

а) укрупнение частиц с полным растворением первоначального сухого ядра и уменьшением показателя преломления (модель однородной сферы (ОС));

б) укрупнение частиц с частичным растворением первоначально сухого ядра (модель ДС);

в) укрупнение частиц с частичным растворением первоначально сухого ядра (модель ПС).

Поскольку большинство частиц морского аэрозоля в пограничном слое атмосферы гигроскопичны, влияние влажности на их физико-химические и оптические свойства велико. Высокий процент содержания растворимых солей в этих частицах позволяет использовать хорошо развитую термодинамическую теорию роста капель насыщенных солевых растворов при оценке влияния относительной влажности воздуха ( $q$ ) на размеры частиц [2–5]. Величина  $h$  и среднеэффективные значения комплексных показателей преломления однородной сферы ( $n_{од} = m_{од} - i\chi_{од}$ ) и оболочки двухслойной сферы ( $n_{дв} = m_{дв} - i\chi_{дв}$ ) вычислялись по следующим формулам [3]:

$$\begin{aligned} h &= \sqrt[3]{1 - G + 4G/3(1 - q)}, \\ m_{од} &= m_в + (m_0 - m_в)/h^3, \\ m_{дв} &= (m_в(h^3 - 1) + m_0G)/(G + h^3 - 1), \\ \chi_{од} &= \chi_в + (\chi_0 - \chi_в)/h^3, \\ \chi_{дв} &= (\chi_в(h^3 - 1) + \chi_0G)/(G + h^3 - 1), \end{aligned} \quad (3)$$

где константа  $G = 0,3$ , а показатель преломления воды  $m_в = 1,33$ . Радиусы ядра  $r_1$  и оболочки  $r_2$  и комплексный показатель преломления

ядра  $n_0$  ПС и двухслойных частиц задавались равными по величине. Размеры однородных сфер при этом соответствовали внешним размерам двухслойных частиц.

При вычислении ИХС полидисперсных систем ПС и ДС для заданного  $q$  параметр  $h$  для всех частиц ансамбля выбирался одинаковым, не зависящим от их внешнего радиуса [3, 4]. Комплексный показатель преломления  $n_2$  для модели ПС задавался так, чтобы при заданных геометрических размерах частиц средний по объему показатель преломления  $\bar{n}_{пр} = \int_V n(r)dV/V$  ПС был равен соответствующему среднему по объему показателю преломления ДС  $\bar{n}_{дв}$ .

Близость характеристик  $K_{п}$ ,  $K_0$  и  $w_0$  для рассматриваемых моделей оценивалась отношениями

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{F_{пр} - F_{дв}}{F_{дв}}, \quad \Delta_2 = \frac{F_{пр} - F_{од}}{F_{од}}, \\ \Delta_3 &= \frac{F_{дв} - F_{од}}{F_{од}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $F_{пр}$ ,  $F_{дв}$  и  $F_{од}$  – значения соответствующих ИХС для моделей ПС, ДС и ОС.

### Сравнение характеристик рассеяния света радиально-неоднородными, однородными и двухслойными частицами морского аэрозоля

Для оценки влияния внутренней структуры частиц типа (1) на ИХС мелкодисперсной составляющей морского аэрозоля был проведен численный эксперимент для модели аэрозоля [15], предложенной Рабочей группой по стандартной радиационной атмосфере (SRA) для типовых расчетов радиационных характеристик в пограничном слое над морем (0–2 км). Заметим, что в основу модели [15] взята модель Шеттла и Фена [13], которая широко используется многими авторами. В справочной модели SRA (1984) принимается, что распределение частиц по размерам для аэрозольного компонента аппроксимируется логарифмически нормальным распределением сферических частиц по радиусам. В соответствии с этими рекомендациями [15] спектр размеров сульфатной составляющей будем аппроксимировать логарифмически нормальным распределением сферических частиц по радиусам

$$f(r) = dN/d\ln r = (\sqrt{2\pi} \ln 10 \sigma)^{-1} \exp(-0,5(\ln(r/r_m)/\ln 10/\sigma)^2). \quad (5)$$

Параметры этого распределения (стандартное отклонение  $\sigma$  и модальный радиус  $r_m$ ) принимали следующие значения [16]:

$$\sigma = 0,15 - 0,55 \text{ с шагом } 0,015, \quad (6)$$

$$r_m = 0,02 - 0,06 \text{ мкм с шагом } 0,0016. \quad (7)$$

Всего рассмотрено 675 фракций, характерных для морского аэрозоля в пограничном слое. Значения относительной влажности менялись в диапазоне

$$q = 0,5 - 0,95 \text{ с шагом } 0,01. \quad (8)$$

Рассматривались следующие длины волн, наиболее часто используемые для оптических наблюдений:

$$\lambda = 0,2, 0,25, 0,3, 0,3371, 0,4, 0,488, 0,5145, 0,55, 0,6328, 0,6943, 0,86, 1,06 \text{ мкм}. \quad (9)$$

Для этих длин волн, в соответствии с рекомендациями [14, 16], выбирались значения показателей преломления  $n_0$  и поглощения  $\chi_0$  сухого вещества ядра аэрозольных частиц.

С учетом вышесказанного по формуле (3) из [8] для заданных  $\lambda$ ,  $q$  и вариаций функций распределения с параметрами (6) и (7) были рассчитаны ИХС полидисперсных ансамблей ПС, ДС и ОС. Последние в дальнейшем использовались для вычисления функций  $\Delta_{1, 2, 3}(\lambda, q, n_0, \chi_0, \sigma, r_m)$ , описывающих набор различий ИХС аэрозольных моделей (ансамблей ПС, ДС и ОС) в зависимости от относительной влажности воздуха и длины волны. Всего было рассчитано 337 500 значений  $\Delta$  для каждого из рассматриваемых в данной работе механизмов обводнения аэрозольных частиц во влажной атмосфере.

Как показал анализ расчетных данных, полидисперсный показатель рассеяния  $K_p$  слабо чувствителен к внутренней структуре частиц (1) аэрозоля. При существенно различных условиях расчета в диапазонах размеров (6) и (7) этот показатель с погрешностью, не превышающей 10–15%, может быть аппроксимирован с помощью модели однородных частиц со средним по объему показателем преломления.

Типичная картина поведения характеристик  $K_p$ ,  $K_0$  и  $w_0$  в зависимости от параметра  $\lambda$  для рассматриваемых моделей обводнения частиц аэрозоля при  $q = 0,8$  представ-

лена на рис. 2 для случая  $\sigma = 0,181$  и  $r_m = 0,028$  мкм.

Как видно из рис. 2в, альbedo однократно-го рассеяния  $w_0$  для рассматриваемого слу-

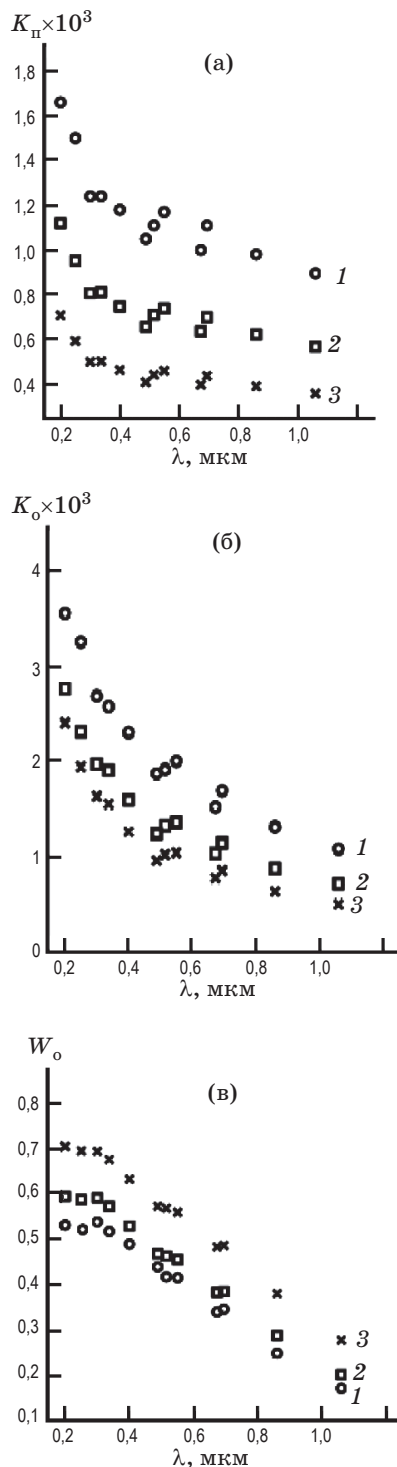


Рис. 2. Спектральный ход коэффициентов поглощения  $K_p$  (а), ослабления  $K_0$  (б) и альbedo однократного рассеяния  $w_0$  (в) полидисперсных систем мелкодисперсной составляющей океанского аэрозоля с  $r_m = 0,028$  мкм и  $\sigma = 0,18$  в приближении просветленных (кривая 1), двухслойных (2) и однородных (3) сфер.

чая для частиц ПС (кривая 1) качественно повторяет ход аналогичных характеристик для двухслойных и однородных частиц (кривые 2, 3). Однако в целом слоисто-неоднородная структура частиц аэрозоля оказывает существенное влияние на эту характеристику – различия  $w_0$  для ПС и ОС достигают 35%, а для ПС и ДС 15%.

Зависимость  $K_{\text{п}}(\lambda)$  для ПС (рис. 2а, кривая 1) сохраняет общие тенденции спектрального хода этой характеристики для частиц ДС и ОС (кривые 2, 3). При этом существенно увеличивается поглощение и сохраняется нейтральный ход  $K_{\text{п}}$  в видимой области спектра излучения. Аналогичные выводы можно сделать и для характеристики  $K_0$ .

Главной отличительной особенностью светорассеяния на частицах аэрозоля с внутренней структурой типа ПС является существенное перераспределение рассеянной и поглощенной радиации, что в конечном итоге приводит к увеличению их поглощения и ослабления. Как видно из сопоставления кривых на рис. 2, на всем рассматриваемом интервале  $\lambda$  (9) значения характеристик  $K_{\text{п}}$  и  $K_0$  частиц ПС значительно выше аналогичных характеристик для частиц ДС и ОС. Эти различия наибольшие в ультрафиолетовой части спектра ( $\Delta_2 = 200\%$ ,  $\Delta_1 = 60\%$ ).

Для расчета энергетики атмосферы важно знать интегральные радиационные характеристики: показатель поглощения  $K_{\text{п}}$ , альbedo однократного рассеяния  $w_0$ . Сравним поведение этих характеристик модели ПС с аналогичными характеристиками хорошо изученных и наиболее часто используемых в оптике атмосферы моделей ДС и ОС.

Для оценки влияния влажности воздуха  $q$  и длины волны  $\lambda$  на ИХС рассмотрим поведение усредненных функций  $\Delta_{1,2,3}^*(m_0, \chi_0)$ , которые при заданных  $\lambda$  и  $q$  из (4), (5) рассчитывались как среднее от характеристик  $\Delta_{1,2,3}(m_0, \chi_0, \sigma, r_m)$  по реализации из 675 фракций аэрозоля (соответственно с параметрами  $\sigma$  и  $r_m$  из (6), (7)). Эта функция может быть представлена как

$$\Delta_{1,2,3}^*(\lambda, q) = \sum_1^{675} \Delta_{1,2,3}(m_0, \chi_0, \sigma, r_m) / 675. \quad (10)$$

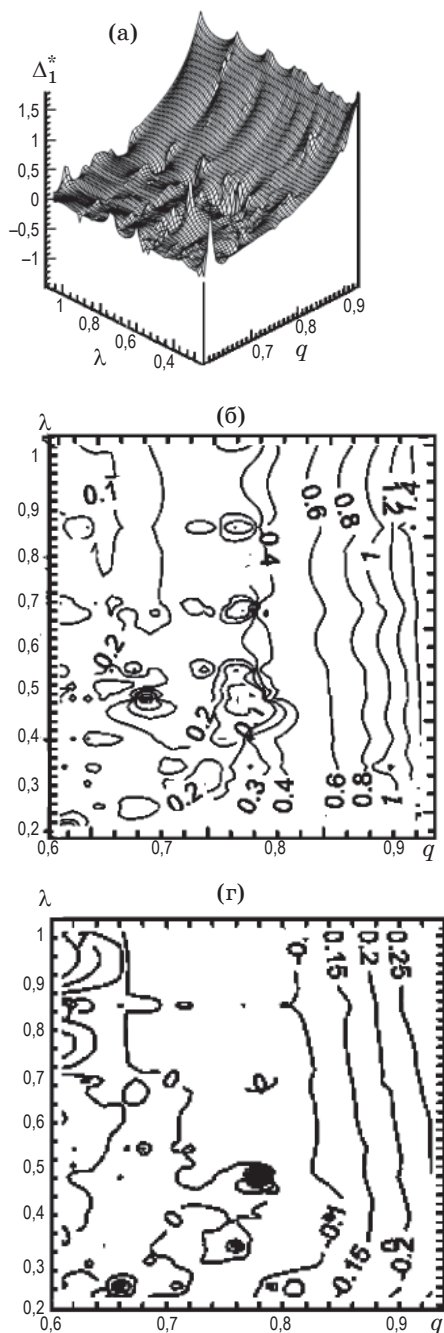
Результат численного эксперимента представлен на рис. 3а в виде трехмерного графика для характеристики  $\Delta_1^*(\lambda, q, n_0, \chi_0)$ , которая определяет степень близости коэффициентов поглощения рассматриваемых аэрозольных моделей.

Увеличение влажности влечет за собой перестройку внутренней структуры гигроскопичных аэрозольных частиц. Эти факторы в конечном итоге приводят к существенному изменению коэффициентов поглощения и ослабления взвеси. Как видно на рис. 3а, характеристика  $\Delta_1^*$  слабо зависит от длины волны  $\lambda$ , но монотонно возрастает от 20 до 100% с увеличением относительной влажности  $q$  от 0,7 до 0,85. Таким образом, внутренняя структура частиц аэрозоля вида ПС и ее перестройка под влиянием влажности оказывают большое воздействие на энергетические характеристики излучения. Этот вывод качественно отличается от результатов работ [3, 4], авторы которых, используя в расчетах модели ДС и ОС, установили, что вариации коэффициентов ослабления с увеличением относительной влажности  $q$  в видимом диапазоне волн не превышают 10–15%.

Как следует из анализа графиков изолиний (рис. 3б), иллюстрирующих близость рассматриваемых характеристик, и табл. 1, при значениях влажности  $q < 0,7$  величина  $\Delta_1^*$  (сравниваются модели ПС и ДС) для коэффициента поглощения не превышает 20%. При значениях влажности воздуха  $q > 0,7$  значение  $\Delta_1^*$  возрастает до 120%. Как видно из рис. 3в, характеристика  $\Delta_2^*$  (модели ПС и ОС) более чувствительна к изменению внутренней структуры частиц под действием влажности. Практически во всем рассматриваемом диапазоне  $q$  (8) величина  $\Delta_2^*$  превышает 50%, а при  $q = 0,9$  коэффициент поглощения частиц ПС в 3 раза больше, чем у модели ОС.

Результаты расчетов показывают, что слоистая неоднородная структура частиц (1) аэрозоля при  $q > 0,75$  влияет на поведение альbedo однократного рассеяния. В частности, разности  $\Delta_1^*$ ,  $\Delta_2^*$  характеристик  $w_0$  полидисперсных моделей ПС, ДС и ОС (рис. 3г, 3д) монотонно увеличиваются пропорционально фактору формы частиц  $h$ . Чем больше толщина оболочки, тем сильнее частицы ПС поглощают световой поток. Как видно из табл. 2, в коротковолновом окне прозрачности атмосферы (0,35–0,7 мкм) характеристики  $\Delta_1^*$  меняются от 10% ( $q = 0,7$ ,  $h = 1,26$ ) до 30% ( $q = 0,94$ ,  $h = 1,94$ ). Отметим, что характеристики  $\Delta_2^*$  (разности ПС и ОС) здесь существенно выше и достигают 40% ( $q = 0,9$ ).

Таким образом, слой частиц ПС может существенно уменьшать величину потока, проходящего на подстилающую поверхность и тем



**Рис. 3.** Спектральный ход разности оптических характеристик света  $\Delta_1^*(\lambda, m_0, \chi_0)$  в зависимости от относительной влажности воздуха  $q$  для коэффициента поглощения (а). Графики изолиний характеристики  $\Delta_1^*(\lambda, m_0, \chi_0)$  систем ПС и ДС (б), характеристики  $\Delta_2^*(\lambda, m_0, \chi_0)$  систем ПС и ОС (в) для коэффициента поглощения. Графики изолиний характеристик  $\Delta_1^*(\lambda, m_0, \chi_0)$  (г) и  $\Delta_2^*(\lambda, m_0, \chi_0)$  (д) для альbedo однократного рассеяния.

самым понизить температуру подстилающей поверхности.

### Выводы

1. Увеличение поглощающих свойств материала слоисто-неоднородных частиц вида (1) приводит к резкому увеличению оптической активности мелкодисперсной фракции (“ядра конденсации”) морского аэрозоля.

2. Внутренняя структура частиц аэрозоля вида ПС и ее перестройка под влиянием влаж-

ности оказывают большое воздействие на энергетические характеристики излучения.

3. Предложенная модель ПС является примером возможного получения необходимых для радиационных расчетов сведений о коэффициенте поглощения и альbedo однократного рассеяния реальными частицами морского аэрозоля в пограничном слое атмосферы.

4. Рассмотренные механизмы обводнения гигроскопичных частиц аэрозоля позволили выявить основные особенности в поведении

**Таблица 1.** Значения разностей оптических характеристик света  $\Delta_1^*(\lambda, n_0, \chi_0, h)$  и  $\Delta_2^*$  для коэффициента поглощения в ультрафиолетовой, видимой, ближней и дальней ИК областях спектра для относительной влажности  $q = 0,5, 0,7, 0,8$  и  $0,9$

$\lambda$ , мкм	$q = 0,5, h = 1,145$		$q = 0,7, h = 1,267$		$q = 0,8, h = 1,392$		$q = 0,9, h = 1,675$	
	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$
0,2	0,071	0,325	0,198	0,675	0,365	1,09	0,943	2,45
0,25	0,008	0,262	0,001	0,001	0,369	1,11	0,909	2,34
0,3	0,028	0,315	0,127	0,697	0,356	1,13	0,931	2,2
0,337	0,113	0,443	0,191	0,707	0,379	1,16	0,934	2,43
0,4	0,034	0,335	0,212	0,743	0,398	1,2	0,963	2,49
0,488	0,111	0,465	0,22	0,759	0,412	1,23	1,01	2,56
0,515	-0,16	0,0843	0,185	0,649	0,416	1,23	1,01	2,57
0,55	-0,54	-0,405	0,184	0,709	0,42	1,24	1,02	2,58
0,633	-0,37	-0,196	0,23	0,794	0,433	1,26	1,04	2,61
0,694	-0,35	-0,177	0,19	0,721	0,429	1,26	1,04	2,61
0,86	-0,42	-0,259	0,23	0,777	0,472	1,32	1,07	2,65
1,06	-0,36	-0,178	0,359	0,976	0,453	1,31	1,08	2,65

**Таблица 2.** Значения разностей оптических характеристик света  $\Delta_1^*(\lambda, n_0, \chi_0, h)$  и  $\Delta_2^*$  для альbedo одно-кратного рассеяния в ультрафиолетовой, видимой, ближней и дальней ИК областях спектра для относительной влажности  $q = 0,5, 0,7, 0,8$  и  $0,9$

$\lambda$	$q = 0,5, h = 1,145$		$q = 0,7, h = 1,267$		$q = 0,8, h = 1,392$		$q = 0,9, h = 1,675$	
	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$
0,2	0,01	-0,09	-0,06	-0,17	-0,12	-0,24	-0,2	-0,3
0,25	-0,01	-0,09	0,001	0,001	-0,09	-0,21	-0,2	-0,29
0,3	-0,27	-0,3	0,04	-0,07	-0,06	-0,17	-0,2	-0,27
0,337	-0,26	-0,3	-0,004	-0,11	-0,07	-0,18	-0,2	-0,28
0,4	-0,26	-0,3	-0,007	-0,12	-0,07	-0,18	-0,2	-0,28
0,488	-0,25	-0,3	0,006	-0,11	-0,07	-0,19	-0,2	-0,3
0,515	-0,27	-0,3	0,009	-0,11	-0,07	-0,19	-0,2	-0,3
0,55	-0,25	-0,3	0,007	-0,11	-0,07	-0,193	-0,2	-0,31
0,633	-0,25	-0,3	0,03	-0,08	-0,07	-0,2	-0,2	-0,3
0,694	-0,26	-0,4	0,02	-0,1	-0,07	-0,2	-0,2	-0,33
0,86	-0,22	-0,3	-0,02	-0,15	-0,11	-0,25	-0,2	-0,36
1,06	-0,25	-0,4	0,04	-0,12	-0,09	-0,25	-0,3	-0,39

коэффициентов поглощения и ослабления ПС. Установлено, что

– при значениях относительной влажности выше 60% коэффициент рассеяния может быть с удовлетворительной точностью (10–15%) аппроксимирован с помощью систем двухслойных и однородных сфер;

– неучет радиальной неоднородности структуры аэрозольных частиц может привести к большим (более 50%) погрешностям при оценке коэффициентов поглощения и ослабле-

ния. Это обстоятельство может служить причиной больших погрешностей при расчете радиационного и термического режимов пограничного слоя атмосферы;

– характеристики  $\Delta_1^*$  и  $\Delta_2^*$ , описывающие близость коэффициентов поглощения, ослабления и альbedo однократного рассеяния, слабо зависят от длины волны.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (грант № 2Ф-11).

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондратьев К.Я.* Радиационные факторы современных изменений глобального климата. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 279 с.
2. *Hanel G.* The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air // *Advances in Geophys.* 1976. V. 19. P. 74–183.
3. *Пришивалко А.П., Бабенко В.А., Кузьмин В.Н.* Рассеяние и поглощение света неоднородными и изотропными сферическими частицами. Минск: Наука и техника, 1984. 263 с.
4. *Креков Г.М., Рахимов Р.О.* Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1982. 192 с.
5. *Ивлев Л.С., Довгалоюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем / СПб. НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
6. *Tuomi T.J.* Light scattering by aerosols with layered humidity-dependent structure // *J. Atm. Sci.* 1980. V. 11. № 4. P. 367–375.
7. *Перельман А.Я., Зиновьева Т.В.* Аппроксимация оптических свойств сферических частиц с радиально меняющимся показателем преломления // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2002. Т.38. № 4. С. 515–522.
8. *Кокорин А.М.* Рассеяние света полидисперсной системой радиально-неоднородных частиц морской взвеси // *Оптический журнал.* 1997. Т. 64. № 8. С. 90–94.
9. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние влажности на характеристики рассеяния света радиально-неоднородными частицами аэрозоля в пограничном слое над морем // *Оптический журнал.* 2000. Т.67. № 1. С. 55–60.
10. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние влажности на индикатрису рассеяния в направлении назад ансамбля малых гигроскопичных неоднородных частиц // *Оптический журнал.* 2003. Т. 70. № 5. С. 13–19.
11. *Кокорин А.М.* Влияние влажности воздуха на показатель и коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния света радиально-неоднородными частицами аэрозоля в пограничном слое над морем // *Оптический журнал.* 2005. Т. 72. № 2. С. 14–18.
12. *Kerker M., Kauffman L.H., Farone W.A.* Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres, when outer shell has a variable refractive index // *J. Opt. Soc. Amer.* 1966. V. 56. № 8. P. 1053–1056.
13. *Shettle E.P., Fenn R.W.* Models for aerosols in the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. AFGL-TR-79-0214 (U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscomb Air Force Base, Mass.).
14. *Gathmann S.* Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model // *Opt. Eng.* 1983. V. 22. № 1. P. 57–62.
15. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. International Association for Meteorology and Atmospheric Physics. Radiation Commission. Bolder. Colorado. U.S.A. 1984.
16. *Shifrin K.S., Zolotov I.G.* Information content of the spectral transmittance of the marine atmospheric boundary layer // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. № 5. P. 4835–4842.