

А.В. Васильев, Л.С. Ивлев

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЬНЫХ АНСАМБЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Предложен унифицированный подход к описанию моделей ансамблей аэрозольных частиц двухслойной структуры при вычислении их оптических характеристик. Приведены конкретные модели ансамблей двухслойных частиц для основных физических процессов, вызывающих их образование в атмосфере.

1. Введение

В реальной атмосфере существуют условия, когда возникают полидисперсные системы частиц с неоднородной структурой. В частности, к ним можно отнести обводненные частицы, водные и ледяные; частицы, покрытые сажевой оболочкой; сернокислотные и сульфатные частицы с твердым ядром первичного происхождения; сернокислотные частицы с периферийным слоем адсорбированных мельчайших частиц или с пленкой, образовавшейся в результате химических и фотохимических процессов на поверхности микрокапли, а также полые микросферы вулканического происхождения. Все эти системы и их оптические свойства моделируются полидисперсными ансамблями двухслойных сфер.

Но если расчет оптических характеристик модельных ансамблей однородных сферических частиц давно воспринимается как простая рутинная работа, то для ансамблей двухслойных сфер расчеты производились лишь эпизодически, при решении достаточно частных задач, например [1] – обводнение частиц, [2] – стратосферные сульфатные частицы. Подробный обзор указанных расчетов приведен в [3]. Сложность расчетов для ансамблей двухслойных сфер обусловлена, с одной стороны, ограничениями на радиус и мнимую часть комплексного показателя преломления (КПП) оболочки для одиночной сферы [4], с другой – излишней детализацией физических моделей образования двухслойных частиц.

В [5] нами предложен алгоритм, позволяющий снять ограничения при практических вычислениях оптических характеристик двухслойной сферы. Для перехода от одиночной частицы к расчетам характеристик ансамблей двухслойных частиц необходимо математическое описание (модель) указанных ансамблей. Прежде чем предлагать такие модели, заметим, что «массовость» расчетов для ансамблей однородных сфер была во многом достигнута за счет наличия для них «стандартного» набора подобных моделей – функций распределения аэрозольных частиц по размерам (см., например, [6]). Основываясь на этом замечании, можно сформулировать два главных требования к математическим моделям ансамблей двухслойных частиц, пригодным для унификации расчетов их оптических характеристик:

- 1) переход от модели ансамбля однородных частиц к модели ансамбля двухслойных частиц должен осуществляться введением минимального числа дополнительных параметров;
- 2) алгоритм интегрирования по ансамблю однородных частиц должен без принципиальных изменений использоваться для ансамблей двухслойных частиц.

Первое требование вступает в противоречие с физическими принципами моделирования процессов образования и эволюции двухслойных частиц, однако строгое описание таких процессов приведет к тому, что модель будет содержать массу коэффициентов, конкретные значения которых неизвестны и не поддаются экспериментальному измерению. Простые эмпирические или «интуитивно-эмпирические» модели с минимумом параметров предпочтительны не только из-за простоты реализации расчетов, но и из-за возможности постановки и решения задач уточнения параметров модели с помощью экспериментальных измерений, после чего уже можно говорить об адекватности эмпирической модели и ее модификации. В сущности, такой подход уже давно применяется при описании процессов обводнения аэрозольных частиц (см. ниже). В данной работе мы попытались распространить его и на другие случаи образования двухслойных частиц.

2. Методика расчетов

Двухслойная сферическая частица с однородными ядром и оболочкой характеризуется следующими параметрами: полный радиус частицы r , отношение радиуса ядра к полному радиусу g , КПП ядра m_1 и КПП оболочки m_2 . Алгоритм вычисления оптических характеристик (факторов ослабления, рассеяния, индикатрисы или матрицы рассеяния, коэффициентов разложения индикатрисы в ряд по полиномам Лежандра) одиночной двухслойной сферы приведен в [5]. Для вычисления оптических характеристик ансамбля двухслойных сфер надо проинтегрировать соответствующие характеристики одиночной сферы по геометрическим параметрам ансамбля, т.е. по r и g с функцией распределения, причем следует учесть, что КПП ядра и оболочки тоже могут зависеть от r и g . Соответствующие интегралы легко получаются из интегралов для ансамблей однородных частиц, а поскольку выражения для последних общеизвестны, то для экономии места будем приводить все выкладки на примере среднего сечения ослабления:

$$C_e = \pi \int_0^1 dg \int_0^\infty dr r^2 Q_e(r, g, m_1(r, g), m_2(r, g)) F(r, g), \quad (1)$$

где Q_e – фактор ослабления одиночной частицы; $F(r, g)$ – функция распределения для ансамбля двухслойных частиц.

Вычисление двойного интеграла (1) и необходимость задания двумерной функции распределения $F(r, g)$ крайне усложняют практические расчеты, поэтому будем предполагать, что физические процессы, приводящие к образованию двухслойных частиц, таковы, что все параметры частицы однозначно определяются ее полным радиусом – это общепринятое предположение [3]. Тогда интеграл (1) превращается в одномерный с функцией распределения $F(r)$.

Общепринятым является также следующее допущение. Полагаем, что существует независимое от параметров оболочки распределение ядер двухслойных частиц, т.е. физическая модель образования двухслойных частиц предполагает условия, когда оболочка отсутствует (или существует функция распределения ядер, являющаяся пределом функции $F(r)$ при стремлении к нулю толщины оболочки). Тогда если $f(r)$ – функция распределения ядер, то искомая функция распределения $F(r)$ получается из $f(r)$ в результате трансформации ее, описываемой неким набором параметров модели образования оболочки. Такой подход дает возможность использовать в качестве $f(r)$ «стандартные» функции распределения однородных частиц.

Примем, что указанный процесс трансформации может быть описан линейной зависимостью полного радиуса двухслойной частицы

$$r = q_1(p_1, p_2, \dots, p_n) r_c + q_2(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (2)$$

где q_1 и q_2 – некие функции, зависящие от параметров модели образования оболочки p_1, p_2, \dots, p_n , список которых в дальнейшем договоримся в общих формулах опускать; r_c – радиус ядра. Соответственно получаем $F(r) = f(r/q_1 - q_2/q_1)$, формально полагая $F(r) = 0$, если $r/q_1 - q_2/q_1 \leq 0$. Конкретные модели функций q_1 и q_2 будут приведены ниже.

Обозначив m_c КПП исходного вещества ядра и m_s КПП исходного вещества, из которого образуется оболочка, введем аналогичные функции для моделирования относительного размера ядра g и КПП ядра и оболочки:

$$g = q_3(r), \quad m_1 = q_4(r, m_c, m_s), \quad m_2 = q_5(r, m_c, m_s),$$

после чего формула для интегрирования по ансамблю двухслойных частиц (1) примет окончательный вид

$$C_e = \pi \int_0^\infty r^2 Q_e(r, q_3(r), q_4(r, m_c, m_s), q_5(r, m_c, m_s)) f(r/q_1 - q_2/q_1) dr.$$

Задача описания ансамбля двухслойных частиц свелась к построению для конкретных ситуаций набора из пяти функций $q_1 - q_5$, зависящих от параметров модели.

Проверим выполнение второго требования. Вычисление параметров двухслойной частицы через функции q_3, q_4, q_5 , как и подстановка (2) в функцию распределения, не меняет логику

алгоритма интегрирования. Некоторую сложность может составлять лишь вычисление моментов функции $F(r)$:

$$M_i(F) = \int_0^{\infty} r^i F(r) dr,$$

используемых в алгоритме [6]. Но интегрирование с подстановкой (2) элементарно, в результате получаем

$$C(F) = q_1 C(f), \quad M_i(F) = q_2^i + \sum_{j=1}^i C_i^j q_1^j M_j(f) q_2^{i-j}, \quad i \geq 1,$$

где $C(F)$ и $C(f)$ – нулевые моменты ненормированных распределений; C_i^j – биномиальные коэффициенты; $M_j(f)$ – моменты «стандартной» нормированной функции $f(r)$ – см. [6].

Приведем набор характеристик ансамблей двухслойных частиц и примеры модельных расчетов для этих ансамблей. Значения КПП веществ ядра и оболочки для расчетов взяты по [1].

3. Обводненные частицы

Для связи радиуса обводненной частицы r с радиусом ядра r_c используем соотношение Кастена [7] в модификации Хенела [8]:

$$r/r_c = (1 - u)^{-P \lg(1-u) - Q}, \quad (3)$$

где u – относительная влажность воздуха; P и Q – эмпирические константы, в частности рекомендуется $P = 0,0664$, $Q = 0,113$ для континентального аэрозоля и $P = 0,0498$, $Q = 0,173$ для «среднего» аэрозоля.

Формула (3) справедлива при $u < 0,95$. При больших значениях влажности начинается конденсационный рост водяных капель. Для универсальности алгоритма, основываясь на (3), опишем этот рост так, чтобы сохранялась непрерывность при $u = 0,95$ и средний радиус водяных капель при $u = 1$ стал равным некоторому заданному значению R :

$$r/r_c = (1 + d - u)^{(\lg R - \lg M_1(f))/\lg d}, \quad (4)$$

где значение d находится из решения уравнения

$$(0,05 + d)^{(\lg R - \lg M_1(f))/\lg d} = (0,05)^{-P \lg(0,05) - Q}, \quad (5)$$

которое легко решается на ЭВМ методом деления пополам на интервале $0 < d < 1$.

Учтем в нашей модели еще одно обстоятельство. При большом объеме оболочки и плотности нерастворимого ядра меньшей, чем плотность воды, возможно разрушение ядра и «всплытие» его частей к границам оболочки – именно так, например, выглядят на снимках под электронным микроскопом вкрапления сажи в водяной капле. Поэтому введем G – критическое значение параметра g частицы, при котором происходит разрушение ядра (для неразрушающихся ядер $G < 0$).

Таким образом, получаем следующую модель для частиц с нерастворимым обводненным ядром: $q_1 = r/r_c$ находится из (3) – (5), $q_2 = 0$. Если $1/q_1 > G$, то $q_3 = 1/q_1$, $q_4 = m_c$, $q_5 = m_s$. Если $1/q_1 \leq G$, то $q_3 = (1 - 1/q_1)^{3/13}$, $q_4 = m_s$, $q_5 = m_c$.

В случаях обводнения частиц с растворимым ядром для соотношений радиусов оболочки и ядра опять используем (3) – (5). Вычислив массы ядра и оболочки и введя коэффициент растворения вещества ядра, нетрудно найти радиус остатка ядра после растворения. Но такой детальный подход требует введения многих дополнительных параметров: плотностей ядра и оболочки, зависимости плотности раствора от количества растворенного вещества и т.п., что противоречит первому требованию. Учитывая неполноту наших знаний о химическом составе вещества атмосферного аэрозоля, а также приближенный характер аэрозольных моделей, упростим описание, рассматривая «объемные» характеристики растворения. Введем параметр D – отношение объема вещества ядра, которое переходит в насыщенный раствор, к общему объему раствора ($0 \leq D \leq 1$). Поскольку аналогичный параметр в дальнейшем будет использован не только для описания процессов растворения, условимся называть его «коэффициентом

проникновения» вещества ядра в вещество оболочки. В рамках рассматриваемой идеализации будем считать, что объем раствора равен сумме объемов исходных веществ, а КПП растворов и смесей будем вычислять как средневзвешенный по объему.

В результате получаем модель, учитывающую возможность полного растворения ядра: выражения для q_1 – см. выше, $q_2 = 0$. Вычисляем $\Delta = (1 - 1/q_1^3 D)/(1 - D)$. Тогда если $\Delta > 0$ (осталось ядро), то $q_3 = \Delta^{1/3}/q_1$, $q_4 = m_c$, $q_5 = Dm_c + (1 - D)m_s$. Если $\Delta \leq 0$ (полное растворение), то $q_3 = 0$, $q_4 = q_5 = m_c/q_1^3 + (1 - 1/q_1^3) m_s$. Заметим, что модель имеет два важных частных случая. При $D = 0$ мы получаем рассмотренный выше случай нерастворимого неразрушаемого ядра; при $D = 1$ всегда будем иметь случай полного растворения, т.е. однородную частицу со средневзвешенным КПП – модель в приближении однородной смеси.

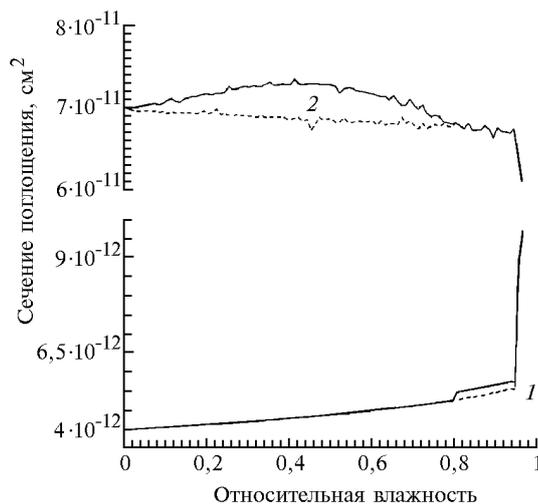


Рис. 1. Зависимость среднего сечения поглощения ансамблей обводненных частиц от относительной влажности; 1 – сажевые частицы: сплошная кривая – разрушающееся ядро, штриховая – неразрушающееся, 2 – органические частицы: сплошная кривая – двухслойная структура, штриховая – приближение однородной смеси

В качестве иллюстрации расчетов для обводненных частиц приведем рис. 1, на котором сплошная кривая 1 показывает зависимость среднего сечения поглощения для модели обводненных сажевых частиц от влажности воздуха для длины волны 0,5 мкм. Параметры модели с нерастворимым разрушающимся ядром: логнормальное распределение радиусов ядер

$$f(r) = 1/(r\sigma\sqrt{2\pi}) \exp([\ln^2(r/r_0)]/(2\sigma^2)) \quad (6)$$

с $r_0 = 0,01$ мкм и $\sigma = 0,7$; $m_c = 1,82 - i0,74$, $m_s = 1,33 - i10^{-9}$, $P = 0,0498$, $Q = 0,173$, $G = 0,8$, $R = 20$ мкм. Для сравнения штриховой кривой 1 приведены результаты расчетов для той же модели, но без учета разрушения ядра ($G = -1$). Как видно из рисунка, учет возможного разрушения ядра не оказывает значимого влияния на величину аэрозольного поглощения, исходя из чего можно рекомендовать при практических расчетах пользоваться традиционной моделью с неразрушающимся ядром.

Второй пример на рис. 1 (кривые 2) – результаты расчета зависимости от влажности воздуха среднего сечения аэрозольного поглощения для длины волны 0,5 мкм при обводнении частиц органической природы (почвенные аэрозоли). Используется модель с растворимым ядром. Ее параметры – логнормальное распределение ядер (6) с $r_0 = 0,1$ мкм и $\sigma = 0,9$; $m_c = 1,45 - i0,001$, $m_s = 1,33 - i10^{-9}$, $P = 0,0498$, $Q = 0,173$, $D = 0,5$, $R = 20$ мкм. Результаты расчетов для указанной модели приведены сплошной кривой, а штриховой, для сравнения, – результаты расчетов для той же модели в приближении однородной смеси ($D = 1$). Как следует из рисунка, модель однородной смеси дает качественно иную картину даже для сильнорастворимого ядра, следовательно, учет двухслойной структуры действительно необходим для более адекватного моделирования оптических свойств атмосферных аэрозолей.

4. Стратосферные сернокислотные частицы

Процессы образования и роста этих аэрозолей еще мало изучены и являются предметом полемики [9]. Одним из механизмов образования подобных частиц считается гетерогенная гетеромолекулярная нуклеация – образование оболочки из 75% раствора серной кислоты на ядрах, которые могут как растворяться, так и не растворяться в H_2SO_4 . Несомненно и подтверждается данными экспериментальных измерений связь между радиусами частиц сернокислотной фракции и концентрацией в стратосфере сернистого газа. Поскольку механизм роста оболочки из H_2SO_4 в данном случае в чем-то эквивалентен процессу ее роста при обводнении, то в модели трансформации частиц (2) можно положить $q_2 = 0$, а функция q_1 должна расти с ростом концентрации SO_2 : в случае стационарного динамического равновесия концентрации SO_2 (постоянный поток) или же для одного и того же момента времени от начала выброса SO_2 при извержении вулкана.

По данным аппроксимации экспериментальных измерений и модельных расчетов [9, 10] можно, в первом приближении, предложить простейшую зависимость: $q_1 = 1 + CQ$, где Q – концентрация SO_2 , см^{-3} , C – эмпирическая константа, характеризующая скорость процесса окисления SO_2 в SO_3 , которую грубо можно оценить как $C = 10^{-7} \text{см}^3$. Остальные функции $q_3 - q_5$ можно выбирать точно такими же, как в случае обводнения – модель с растворимым ядром, с учетом предельного случая $D = 0$ для нерастворимых ядер.

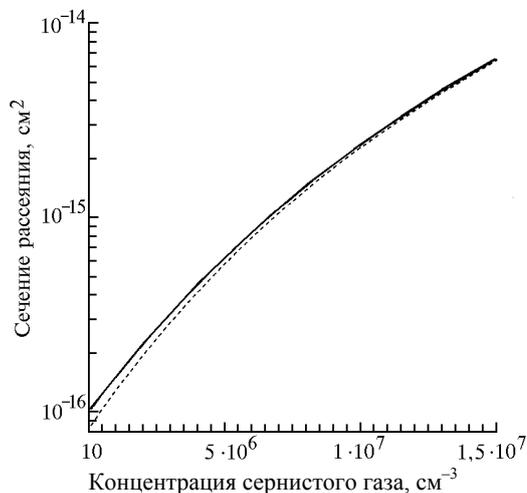


Рис. 2. Зависимость среднего сечения рассеяния ансамбля сернокислотных стратосферных аэрозолей от концентрации SO_2 : сплошная кривая – с учетом двухслойной структуры, штриховая – без учета

На рис. 2 приведена зависимость среднего сечения аэрозольного рассеяния для силикатных ядер с сернокислотной оболочкой от концентрации SO_2 на длине волны 0,5 мкм. Для ядер использовано обратное гамма-распределение $f(r) = Ar^{-1-a} \exp(-r_0/r)$, где A – нормировочный множитель (см. [6]), параметры (из [2]) $a = 5$, $r_0 = 0,01$ мкм. Значения КПП: $m_c = 1,48 - i2,5 \cdot 10^{-4}$, $m_s = 1,43 - i10^{-8}$; ядро нерастворимо – $D = 0$. Для сравнения (штриховой кривой) приведены результаты расчетов по той же модели, но для однородных сернокислотных частиц. Как следует из рисунка, учет внутренней структуры особенно полезен при расчетах для мелких частиц (фоновые модели стратосферного аэрозоля).

5. Частицы с адсорбированной оболочкой

Ряд процессов (покрытие стратосферных сернокислотных аэрозолей минеральной компонентой, взаимодействие частиц сажи с облачными каплями, покрытие аэрозольных частиц над морями и океанами оболочкой из соли и др.) можно также описать моделью двухслойных частиц. Здесь могут возникать разнообразные варианты в зависимости от того, твердое или жидкое, растворимое или нет вещество ядра и оболочки. Однако если не выходить за рамки рассматриваемых моделей двухслойных сфер с однородными ядром и оболочкой и не прибегать к излишней детализации, то для этих ситуаций можно построить единое математическое описание.

Допустим, что ядра и адсорбируемые частицы существуют отдельно. Тогда, считая, что вещество оболочки равномерно обволакивает частицы ядра, получаем параметры роста радиу-

са частицы: $q_1 = 1$, $q_2 = 1/3 CR^3/[M_2(f)]$, где C – относительная концентрация адсорбированных частиц (отношение числа адсорбированных частиц к числу ядер в единице объема); R – средний радиус адсорбированных частиц. Заметим, что, исходя из модельного характера параметров, следует с определенной долей условности относиться к смыслу величин C и R . Возможное взаимодействие (растворение) ядра и оболочки будем описывать в «объемном» приближении, аналогично тому, как это было сделано для случая обводнения. Введем, пока формально, еще два параметра: D_1 – коэффициент проникновения вещества ядра в вещество оболочки и D_2 – коэффициент проникновения вещества оболочки в вещество ядра. Тогда, вычислив $v = (1 - q_2/r)^3$, $\Delta = v/(1 - D_2) - (1 - v)D_1/(1 - D_1)$, получим: если $0 < \Delta < 1$, то $q_3 = \Delta^{1/3}$, $q_4 = (1 - D_2)m_c + D_2m_s$, $q_5 = D_1m_c + (1 - D_1)m_s$; если $\Delta \leq 0$ или $\Delta \geq 1$ (полное растворение), то $q_3 = 0$, $q_4 = q_5 = vm_c + (1 - v)m_s$.

Рассмотрим теперь использование предложенной формальной модели при описании конкретных ситуаций. Для частиц с твердым ядром и жидкой оболочкой имеем $D_2 = 0$ и $D_1 > 0$ для растворимого ядра, $D_1 = 0$ для нерастворимого. Для частиц с жидким ядром и жидкой оболочкой используем «приближение взаимного перемешивания», полагая, что коэффициент проникновения вещества ядра в оболочку равен коэффициенту проникновения вещества оболочки в ядро ($D_1 = D_2 = D$). Случай $D = 0$ соответствует невзаимодействующим ядру и оболочке. Для частиц с твердым ядром и твердой оболочкой оболочка образуется как отдельные вкрапления на периферии ядер. Примем в рамках модели, что вещество оболочки равномерно распределяется по поверхности ядра, а учет вкраплений осуществляется в приближении перемешивания части вещества ядра и всей оболочки. Тогда $D_2 = 0$, а D_1 – параметр, определяющий степень перемешивания (чем больше D_1 , тем толще оболочка, но тем ближе ее КПП к КПП ядра). Наконец, для частицы с жидким ядром и твердой оболочкой необходимо еще учесть возможность растворения оболочки в ядре. В этом варианте получаем общий случай с необходимостью задания и значения D_1 , и значения D_2 .

В качестве иллюстрации для этой модели рассмотрим процесс взаимодействия частиц сажи с облачными каплями. Капли описываются распределением Хргиана – Мазина $f(r) = Ar^2 \exp(-br)$, где A – нормировочный множитель (см. [6]), а $b = 0,03 \text{ мкм}^{-1}$. Значения m_c и m_s (вода и сажа) приведены выше, $R = 0,05 \text{ мкм}$, $D_2 = 0$.

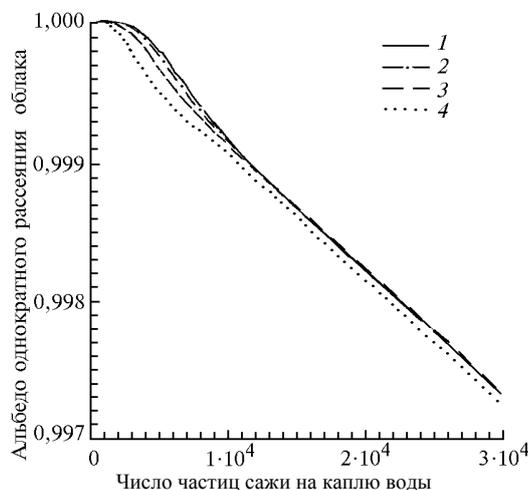


Рис. 3

На рис. 3 приведена зависимость альбедо однократного рассеяния облака (отношение среднего сечения рассеяния к среднему сечению ослабления) для длины волны 0,5 мкм от относительной концентрации сажи C для четырех значений параметра D_1 (1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 0,5). Как следует из рис. 3, чтобы понизить альбедо до диапазона 0,999 – 0,990, где начинает проявляться поглощение света в облаке, требуется огромное количество сажи (десятки тысяч частиц на каплю воды – не менее 10 мг/м^3). Это подтверждает невозможность объяснения экспериментально обнаруженного аномально высокого поглощения в слоистых облаках [11] модельными расчетами их оптических свойств [12].

6. Частицы с оболочкой постоянной толщины

Некоторые физические процессы должны приводить к образованию двухслойных частиц с оболочкой постоянной толщины. Это могут быть тонкие пленки, образовавшиеся в результате химических (фотохимических) реакций на поверхности частицы, или полые частицы («пузырьки»), образующиеся при испарении и разбрызгивании вулканической лавы. Модель для указанных частиц: $q_1 = 1$, $q_2 = B$, $q_3 = 1 - B/r$, $q_4 = m_c$, $q_5 = m_s$, где B – толщина оболочки.

На рис. 4 приведен пример двух расчетов спектральной зависимости среднего сечения аэрозольного ослабления для полых частиц в видимом диапазоне спектра при $B = 0,1$ и $0,5$ мкм. Для ядер использовано логнормальное распределение (6) с $r_0 = 0,5$ мкм, $\sigma = 0,9$. Параметры $m_c = 1$ (газ), m_s – спектральная кривая для силикатов из [1]. По рисунку видно практическое отсутствие аномалий спектрального хода, вызванных интерференционными явлениями в оболочке [5], для частиц с тонкими оболочками и наличие аномалий для размеров оболочек порядка длины волны. Однако, учитывая малую долю вулканических полых частиц в суммарном атмосферном аэрозоле, сомнительно, чтобы подобные аномалии можно было обнаружить при измерениях спектральной прозрачности.

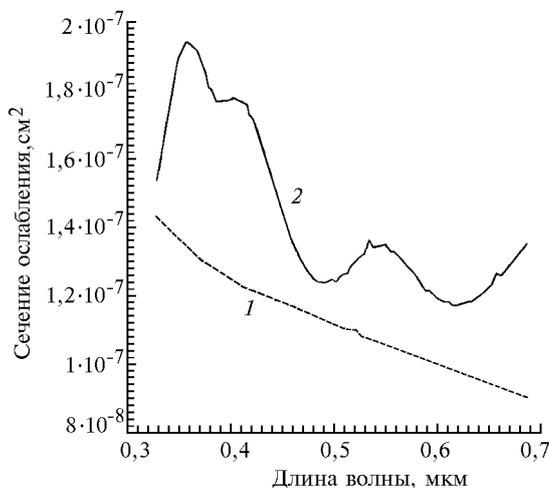


Рис. 4. Спектральный ход среднего сечения ослабления ансамбля полых частиц: 1 – толщина оболочки 0,1 мкм; 2 – 0,5 мкм

7. Однородные частицы

Однородные частицы являются очевидным частным случаем предлагаемого подхода к интегрированию по ансамблям двухслойных частиц: $q_1 = 1$, $q_2 = 0$, $q_3 = 0$, $q_4 = q_5 = m_c$. Технически это означает удобную возможность использования программы интегрирования по ансамблям двухслойных частиц, в том числе и для расчетов характеристик ансамблей однородных сфер.

8. Заключение

Предлагаемый подход к вычислению оптических характеристик аэрозольных ансамблей двухслойных сферических частиц позволяет перейти от ставших традиционными расчетов для ансамблей однородных сфер к столь же «массовым» расчетам для ансамблей двухслойных сфер. Это позволит создавать более адекватные оптические модели атмосферного аэрозоля, поскольку многие важные эффекты, возникающие при учете двухслойной структуры частиц, не могут быть получены в рамках моделей однородных сфер.

Тематика данной работы поддержана РФФИ, грант номер 96-05-64612.

1. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
2. Ивлев Л.С., Коростина О.М. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 6. С. 802–806.
3. Пришивалко А.П., Бабенко В.А., Кузьмин В.Н. Рассеяние и поглощение света неоднородными и анизотропными сферическими частицами. Минск: Наука и техника, 1984. 263 с.
4. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
5. Васильев А.В., Ивлев Л.С. Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 12. С. 1552–1561.

6. В а с и л ь е в А. В. Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однослойных сферических аэрозольных частиц. II. Ансамбли частиц // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 4. Физика, химия. 1997. Вып. 1. N 4 (в печати).
7. K a s t e n F. // Tellus. 1969. V. 21. N 5. P. 631–635.
8. H a n e l G. // Beitr. Phys. Atmosph. 1971. V. 44. N 2/3. P. 137–167.
9. К р е к о в Г. М., З в е н и г о р о д с к и й С. Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 277 с.
10. И в л е в Л. С., С и р о т а В. Г., Х в о р о с т о в с к и й С. Н. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 1. С. 37–43.
11. P i l e w s k i s P., V a l e r o F. P. J. // Science. 1995. V. 267. P. 496–499.
12. Р а д и а ц и я в облачной атмосфере / Под. ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.

Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского государственного университета

Поступила в редакцию
6 января 1997 г.

A. V. V a s i l y e v, L. S. I v l e v. Empirical Models and Optical Characteristics of Aerosol Polydispersion Two-Layer Spherical Particles.

Unified approach to the description of models of two-layer structured polydispersion aerosol particles is suggested for calculation of their optical characteristics. Several specific models of polydispersion particles are presented accounting for basic physical processes, which stimulate their formation in the atmosphere.