

А.В. Васильев, Л.С. Ивлев

## Об оптических свойствах загрязненных облаков

*Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета*

Поступила в редакцию 2.07.2001 г.

Рассмотрены некоторые возможные механизмы взаимодействия облачных капель с частицами сажи и оптические свойства соответствующих систем. Показано, что при достаточно высокой, но реальной концентрации сажи альbedo однократного рассеяния облака может достигать диапазона, достаточного для воспроизведения эффекта аномально высокого поглощения в облаках.

Экспериментальные и теоретические исследования радиационного режима облачной атмосферы показывают, что оптически активные антропогенные аэрозоли существенно влияют на оптические характеристики облаков. Так, одной из актуальных проблем современной атмосферной оптики является аномальное поглощение в слоистых облаках. Экспериментальные измерения оптических свойств слоистой облачности дают значения альbedo однократного рассеяния облака в видимой области спектра, которые существенно меньше, чем следует из расчетов по теории Ми [1, 2]. В связи с предпринимаемыми в последнее время попытками нестандартного объяснения аномального поглощения (от объявления его результатом неправильной интерпретации экспериментальных данных до пересмотра механизмов взаимодействия электромагнитных волн с облачными частицами) настоящая статья посвящена поиску ответа на вопрос: «Действительно ли возможности объяснения аномального поглощения в рамках классической теории рассеяния до конца исчерпаны?».

Поскольку поглощение чистой воды в видимой области спектра ничтожно мало, остается предположить, что в составе облака присутствует поглощающий аэрозоль: либо независимо перемешанный с водяными каплями, либо взаимодействующий с ними. Численные оценки показывают, что единственным подобным аэрозолем при реальных значениях его концентраций могут быть лишь сажевые частицы.

Как натурные, так и лабораторные исследования поведения сажевых частиц в присутствии капельной фракции свидетельствуют о разнообразии их состояний в такого рода двухфазной среде, зависящем от источника, механизма образования сажи, от присутствия в атмосфере различных примесей (озона, сернистого газа, серной и азотной кислот и т.п.), времени их пребывания в облачной среде.

Можно представить следующие морфологические структуры, существующие в загрязненных облаках:

1) мелкодисперсные сажевые частицы, моделируемые сферами;

2) облачные капли, покрытые мельчайшими сажевыми частицами;

3) водные капли с центральным сажевым ядром, которое можно приближенно моделировать сферой;

4) сажевые частицы типа фракталов;

5) сажевые фракталы, уплотненные под воздействием высокой влажности с несколькими крупными глобулами или трансформировавшимися в частицу, которую можно моделировать вытянутым сфероидом.

В настоящей статье рассмотрены варианты 1–3. Вариант 1 – это стандартная модель независимо перемешанных водяных и сажевых частиц, которые считаются однородными сферами. Вариант 2 моделируется в приближении двухслойной сферы, имеющей оболочку, комплексный показатель преломления которой рассчитывается как средневзвешенный по массе сажи и воды в поверхностном слое капли (определяемом радиусом сажевых частиц). Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют о том, что на начальной стадии адсорбция сажи на капле происходит не равномерно, а кусочно [3]. Следовательно, двухслойные сферы с очень тонкими сажевыми слоями реально вряд ли существуют. Наконец, вариант 3 – это опять же стандартная модель двухслойной сферической частицы с сажевым ядром и водяной оболочкой. Электронно-микроскопический анализ аэрозольных частиц позволяет утверждать, что подобные структуры наблюдаются достаточно часто [4]. Для расчетов оптических характеристик двухслойных частиц (модели 2 и 3) были использованы алгоритмы [5, 6].

Для минимизации числа параметров расчетов радиусы всех частиц считались одинаковыми, что позволило свести число варьируемых параметров расчетов к трем:

а)  $Q$  – отношение массы сажи к массе воды в единице объема;

б)  $R$  – радиус водяных капель;

в)  $r$  – радиус сажевых частиц.

Очевидно, что переход к ансамблям частиц не приведет к принципиальному изменению результатов, тем более что целью данной работы являются не «точные»

количественные расчеты, а оценка значений  $Q$ , при которых поглощение в облаке сравнимо с измеренным в экспериментах аномальным.

В качестве наиболее показательной оптической характеристики вычислялась величина  $\omega = 1 - \Lambda$ , где  $\Lambda$  — альbedo однократного рассеяния (соответственно  $\omega$  — отношение сечения поглощения к сечению ослабления).

Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2. При этом для модели 2 (крупная частица с сильно поглощающей оболочкой) при достаточно большом радиусе ядра, из-за вычислительных сложностей, в алгоритме [6] происходит переход от строгих формул расчета оптических характеристик к асимптотическим и оптические характеристики испытывают скачкообразное изменение. Для сечений ослабления

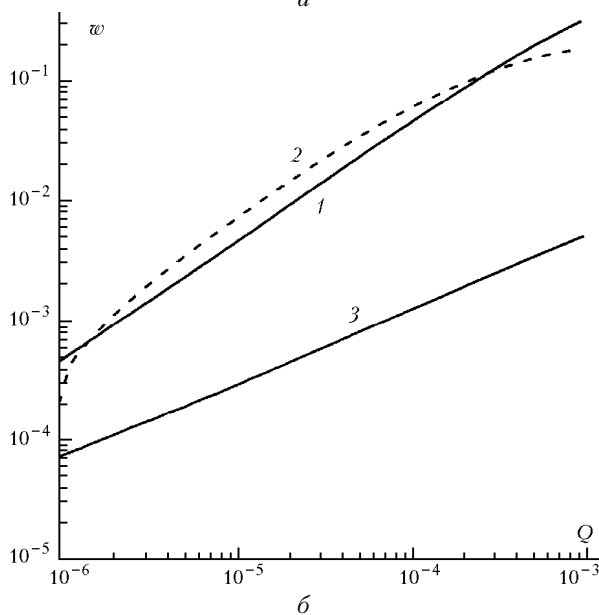
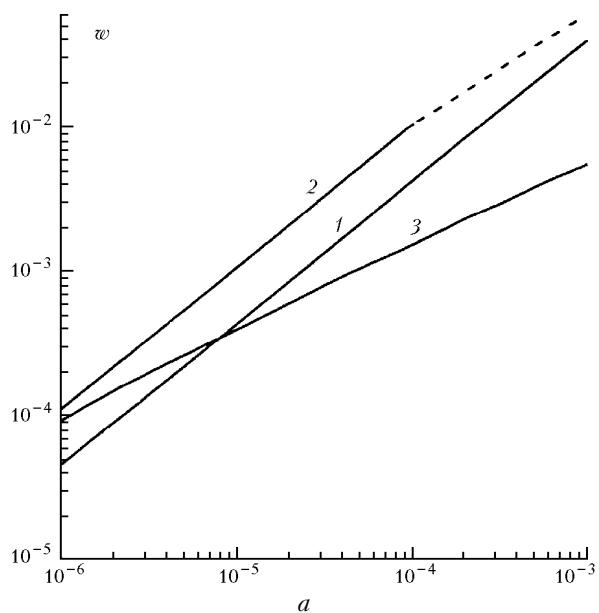


Рис. 1. Зависимость  $\omega(Q)$  для трех моделей взаимодействия капель и сажевых частиц.  $r = 0,005$  мкм. (Пунктиром показана область асимптотических расчетов по [2]).  $a - R = 10$  мкм;  $b - R = 100$  мкм

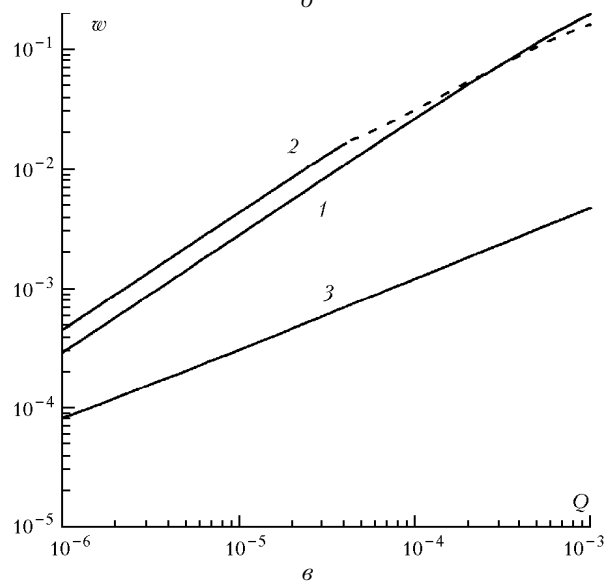
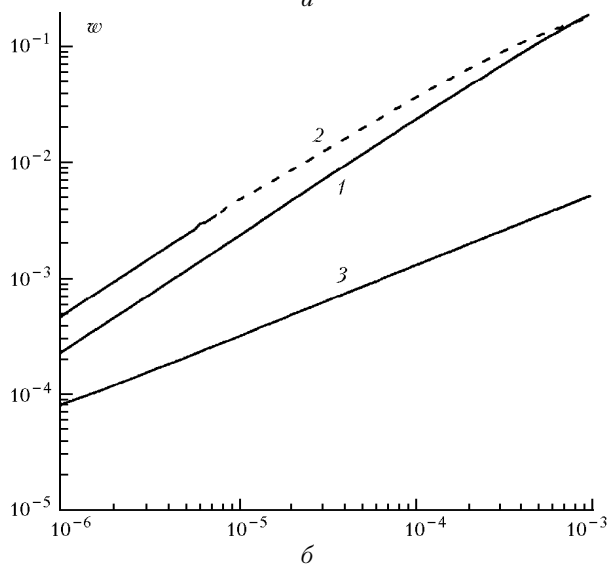
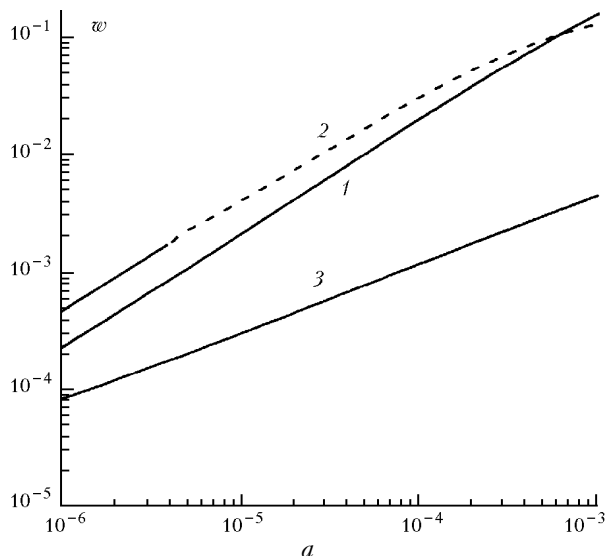


Рис. 2. Зависимость  $\omega(Q)$  для трех моделей взаимодействия капель и сажевых частиц.  $R = 50$  мкм. (Пунктиром показана область асимптотических расчетов по [2]).  $a - r = 0,005$  мкм;  $b - 0,01$  мкм;  $v - 0,05$  мкм

и рассеяния скачок невелик, но для сечения поглощения (которое есть их малая разность) он уже значителен (десятки процентов). Для устранения этого скачка результаты, полученные по асимптотическим формулам, «сшивались» с результатами расчетов по строгой теории. На рис. 1 и 2 такие асимптотические участки показаны пунктиром (если угодно, пунктирным линиям соответствуют менее достоверные результаты, чем сплошным линиям).

При анализе расчетов установлено, что наименьшее альbedo однократного рассеяния (т.е. наибольшее  $\omega$ ) дает модель 2, максимальное – модель 3, а модель 1 занимает промежуточное между ними положение. По имеющимся в литературе оценкам [7], содержание сажи в атмосфере различной степени загрязнения может колебаться от  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  г/м<sup>3</sup>, характерные значения водности слоистых облаков [8, 9] – порядка  $10^{-1}$  г/м<sup>3</sup>. Следовательно, диапазон возможных вариаций параметра  $Q$  – отношения концентраций сажи и воды – составляет  $10^{-7}$ – $10^{-4}$ . Из рис. 1 и 2 видно, что для  $Q$ , близких к  $10^{-5}$ – $10^{-4}$ , вполне достижимы значения альbedo однократного рассеяния 0,999 и даже 0,99, что, по оценкам [1, 7], вполне достаточно для согласования теоретического и экспериментального значений поглощения в слоистом облаке. Интересно отметить, что «нужные» значения альbedo однократного рассеяния дает не только «специальная» модель 2 водной частицы с сажевой оболочкой, но и классическая модель 1 независимо перемешанных однородных водных и сажевых частиц.

Таким образом, при достаточно большой, но реально возможной в сильно загрязненных облаках концентрации сажи модели 2 и даже 1 вполне могут давать значения альbedo однократного рассеяния, совпадающие с экспериментально наблюдаемыми. Следовательно, аномальное поглощение в сильно за-

грязненных облаках находит свое объяснение в рамках классической теории. Однако еще остаются открытыми вопросы, как часто могут встречаться такие облака, как далеко они могут распространяться от источников загрязнения, насколько возможен процесс накопления сажи внутри слоистого облака.

1. *Радикация* в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 280 с.
2. *Гречко Е.И., Дианов-Клоков В.И., Малков И.П.* Измерение эффективной длины пробега фотонов в реальных облачных системах // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1975. Т. 11. № 2. С. 125–138.
3. *Colbeck J., Appleby L., Hardman E.J., Harrison R.M.* The optical properties and morphology of cloud-processed carbonaceous smoke // J. Aerosol Sci. 1990. V. 21. P. 527–538.
4. *Андреев С.Д., Ивлев Л.С.* Моделирование оптических характеристик некоторых специфических форм аэрозолей средней атмосферы // Естественные и антропогенные аэрозоли: Материалы 2-й Международной конференции. Санкт-Петербург, 27 сентября – 1 октября 1999 г. Л.: НИИ химии СПбГУ, 2000. С. 110–112.
5. *Васильев А.В., Ивлев Л.С.* Эмпирические модели и оптические характеристики аэрозольных ансамблей двухслойных сферических частиц // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 856–865.
6. *Васильев А.В., Ивлев Л.С.* Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1552–1561.
7. *Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1999. 258 с.
8. *Облака* и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. П.И. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 648 с.
9. *Мазин И.П., Монахова Н.А., Шугаев В.Ф.* Вертикальное распределение водности и оптических характеристик в континентальных облаках слоистых форм // Метеорол. и гидрол. 1996. № 9. С. 14–34.

*A.V. Vasilyev and L.S. Ivlev. To the problem of optical properties of the polluted clouds.*

Some possible interaction processes of cloud drops with soot particles and the optical properties of these systems are presented. It was shown, that under observed high soot concentration single scattering albedo may have a range, which is sufficient for modeling the effect of anomaly high absorption in clouds.