

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев, Е.Ф. Михайлов, А.А. Киселев

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ ДЫМОВ

Частицы дымов можно рассматривать как агрегаты, имеющие фрактальную структуру, построенные на основе мелких сажевых частиц. На основе результатов исследований оптических характеристик подобных агрегатов предложена модель частицы дыма и проведены расчеты коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и обратного рассеяния. Результаты моделирования позволяют качественно объяснить основные особенности оптических свойств дымов различных типов.

Известно, что частицы атмосферных аэрозолей во многих случаях представляют сложные агрегаты, образуемые множеством мелких, в первом приближении, однородных частиц. Одним из наиболее распространенных примеров такого рода образований могут служить частицы дымов [1]. Естественным представляется тот факт, что практически все физико-химические свойства подобных агрегатов существенно отличаются от соответствующих свойств как однородных массивных частиц, так и системы независимых мелких частиц, образующих агрегат, эквивалентных по размерам (или по массе) агрегату.

В последние годы для исследований разнообразных свойств такого рода образований успешно привлекаются представления и методы теории фрактальных систем [2, 3]. Фрактальные агрегаты – это особым образом организованные структуры, в которых каждый выделенный элемент подобен системе в целом [4]. Применительно к проблеме атмосферных аэрозолей в качестве фракталов можно рассматривать агрегаты, образуемые множеством ( $N \approx 10^2 \div 10^3$ ) частиц, обладающих одинаковыми физико-химическими свойствами, размеры которых существенно меньше размеров системы и мало отличаются для отдельных частиц, а расположение друг относительно друга внутри агрегата описывается достаточно общими статистическими законами. Уже это определение, не вполне строгое и исчерпывающее, свидетельствует, что атмосферные аэрозоли как фрактальные системы можно рассматривать только в достаточно грубом приближении, поскольку <первичные> образующие агрегаты частицы в условиях реальной атмосферы не бывают полностью одинаковыми – существует определенная полидисперсность, да и по составу они могут различаться. Тем не менее исследования подтверждают, что использование подобного приближения позволяет вполне удовлетворительно описать как структуру, так и многие свойства частиц дымов. (Более корректно учесть свойства образований, подобных агрегированным частицам аэрозолей, по-видимому, позволяет приближение мультифракталов, однако построение теории оптических свойств мультифрактальных агрегатов в настоящее время далеко от завершения).

Для описания фрактального агрегата используются такие характеристики, как размер структурного элемента  $a$  (для аэрозолей это средний радиус первичных частиц), количество элементов в составе агрегата  $N$  и фрактальная размерность агрегата  $D$ . Показано, что частицы дымов можно рассматривать как фрактальные структуры, имеющие  $a \approx 0,01 \div 0,05$  мкм,  $N \approx 3 \cdot 10^2 \div 10^4$  и  $D \approx 1,78$  [5]. Конкретные значения параметров фрактальной структуры зависят от механизма образования частиц дымов, и эти зависимости если и не получили еще своего объяснения, то на эмпирическом уровне определены.

В лаборатории физики аэрозолей проведен цикл исследований оптических характеристик агрегатов, имеющих фрактальную структуру [6]. В ходе этих исследований, в частности, проведена проверка применимости теории оптических свойств фракталов [7] и показано, что при учете влияния многократного рассеяния на частицах внутри агрегата эта теория, хотя ее и нельзя рассматривать как вполне строгую, позволяет получать вполне реалистические оценки оптических характеристик агрегатов, удовлетворительно описывающие результаты экспериментальных оптических исследований.

Используя результаты [6], нами проведена серия расчетов оптических характеристик частиц дымов. Результаты этих модельных расчетов и рассматриваются ниже.

При любых попытках численного моделирования прежде всего встает вопрос построения модели изучаемого объекта и выбора его характеристик. Как отмечалось выше, средние размеры <первичных> частиц в зависимости от источника дыма составляют  $a \approx 0,01 \div 0,05$  мкм, а фрактальная размерность образующихся агрегатов  $D \approx 1,78$ . Размеры агрегатов  $R$  колеблются в пределах от нескольких десятых до  $\sim 10$  мкм. Частицы дымов могут существовать в атмосфере в течение длительного времени. Учитывая их рыхлую структуру, процесс гравитационной седиментации подобных частиц малоэффективен. Они удаляются из атмосферы преимущественно в результате вымывания или увлечения нисходящими воздушными потоками.

Частицы дымов естественного происхождения, образующиеся при горении, при благоприятных условиях в атмосфере непосредственно в процессе своего образования могут заноситься на значительные высоты – даже от небольшого костра уровень их проникновения в атмосферу достигает десятков метров; в случае масштабных лесных пожаров они попадают на высоту до  $1,5 \div 2$  км. Дымы промышленного происхождения сознательно выводятся в атмосферу на высотах, достигающих сотен метров. В результате время жизни дымовых частиц может измеряться часами и даже сутками. За столь длительное время своего существования дымовые частицы могут переноситься в атмосфере на расстояния в десятки и сотни километров, претерпевая при этом определенные структурные изменения. Попадая в поле переменной влажности, при повышении влажности воздуха частицы дымов уплотняются. При этом, с точки зрения фрактальной структуры, возрастает значение фрактальной размерности при одновременном уменьшении размеров агрегата.

Если, как в данном случае, речь идет преимущественно об оптических свойствах подобных агрегатов – нельзя игнорировать тот факт, что при изменении влажности окружающего частицу воздуха изменяются эффективные размеры частицы и эффективные значения комплексного показателя преломления вследствие взаимодействия как всего агрегата, так и отдельных образующих его <первичных> частиц с атмосферной влагой. Однако процесс взаимодействия сажевых частиц с атмосферным водяным паром изучен чрезвычайно слабо. В то же время при укрупнении <первичных> частиц вследствие их увлажнения существует вероятность выхода за пределы применимости приближения малых частиц, в то время как теория оптических свойств агрегатов с фрактальной структурой основывается именно на использовании этого приближения (основное допущение теории сводится к изотропности рассеяния на <первичных> частицах, что позволяет в аналитическом виде получить выражения, связывающие оптические характеристики системы с соответствующими характеристиками образующих ее частиц; при появлении значительной вытянутости индикатрисы рассеяния <первичных> частиц можно говорить – с определенными ограничениями – только о численном решении задачи при конкретных условиях).

Более того, само понятие <сажа> в данном случае имеет достаточно условный характер. Частицы дымов состоят не из химически чистого вещества – сажи. В данном контексте под общеупотребительным понятием <сажа> понимается сложная смесь продуктов неполного сгорания; химический состав частиц дымов – и, следовательно, многие их физико-химические свойства – могут существенно различаться для дымов различного происхождения. В связи с этим в настоящей статье рассматриваются лишь вариации оптических характеристик дымов, связанные с различиями структуры частиц, без каких-либо попыток рассмотрения возможных изменений характеристик отдельных мелких частиц, образующих агрегаты, под влиянием меняющейся влажности воздуха.

Но и в этом, представляющем значительное упрощение по сравнению с реальной картиной, случае обнаруживаются определенные сложности в связи с изменчивостью состава частиц дымов. В частности, при интерпретации результатов измерений [6] определенные сложности вызвал вопрос выбора значений комплексного показателя преломления вещества изучавшихся частиц, и, в конечном счете, этот вопрос был решен методом подгонки: выбраны значения комплексного показателя преломления, при которых наблюдается наилучшее согласие расчетных и экспериментальных данных. По-видимому, в настоящее время можно говорить лишь о качественном соотношении величин вещественной и мнимой части комплексного показателя преломления частиц дымов различного происхождения.

При проведении настоящих расчетов использовалось модельное значение комплексного показателя преломления  $\tilde{m} = 1,75 - i0,65$  для видимой области спектра (значение комплексного показателя преломления, использование которого привело к наилучшему согласию эксперимен-

тальных и теоретических данных в [6]) с переходом к модельным значениям  $\tilde{m}$  согласно [8] в области спектра  $\lambda \geq 1$  мкм.

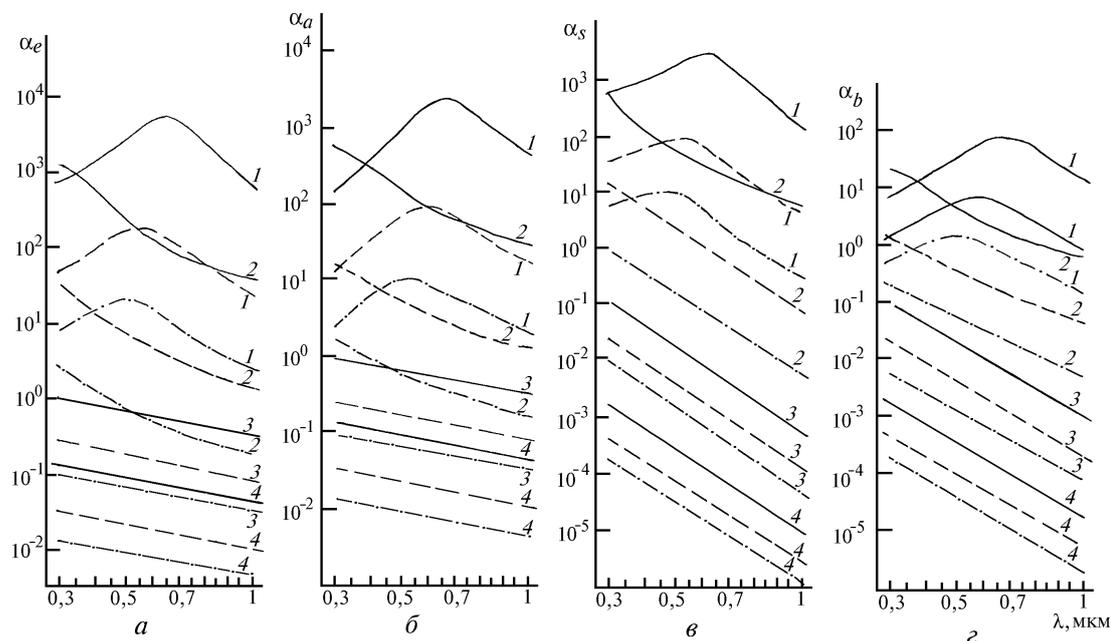


Рис. 1. Коэффициенты ослабления  $\alpha_e(a)$ , поглощения  $\alpha_a(б)$ , рассеяния  $\alpha_s(в)$  и обратного рассеяния  $\alpha_b(г)$  для модели частицы дыма: сплошная линия –  $N = 2000$ ; штриховая –  $N = 500$ ; штрихпунктирная –  $N = 200$  частиц; 1, 3 –  $a = 0,02$ , 2, 4 –  $a = 0,01$  мкм; 1, 2 – агрегат с фрактальной структурой,  $D = 1,78$ ; 3, 4 – система невзаимодействующих частиц

На рис. 1 приведены кривые спектральных коэффициентов ослабления ( $a$ ), поглощения ( $б$ ), рассеяния ( $в$ ) и обратного рассеяния ( $г$ ) для одной из моделей частиц дымов в сравнении с соответствующими характеристиками аналогичной (по массе) системы мелких невзаимодействующих сажевых частиц. Уже простое сопоставление приведенных на рис. 1 кривых свидетельствует, что рассмотрение частиц дымов как агрегатов, имеющих фрактальную структуру, приводит к существенной переоценке их оптических характеристик.

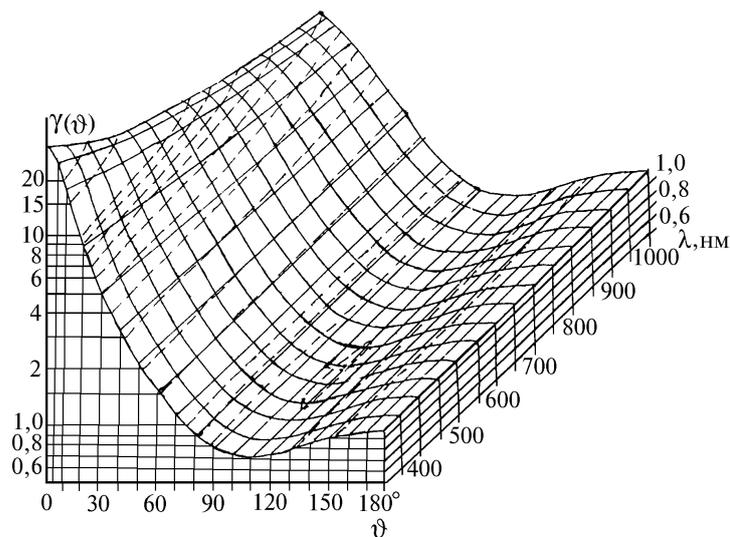


Рис. 2. Нормированные коэффициенты направленного светорассеяния фрактального агрегата в области спектра  $0,3 \div 1,0$  мкм

На рис. 2 приведены индикатрисы рассеяния рассматриваемых агрегатов, а на рис. 3 – сопоставление расчетных оценок с результатами экспериментальных измерений в лабораторных и натуральных условиях.

Представляется, что полученные результаты достаточно убедительно свидетельствуют о том, что использование представлений теории фрактальных агрегатов, с одной стороны, позволяет достаточно реалистично описать результаты экспериментальных исследований, а с другой – заставляет в определенной степени пересмотреть оценки роли дымовых загрязнений атмосферы, используемые в задачах, связанных с изучением климатических последствий ядерной войны, климатообразующего воздействия производственной деятельности и т.п. [9, 10].

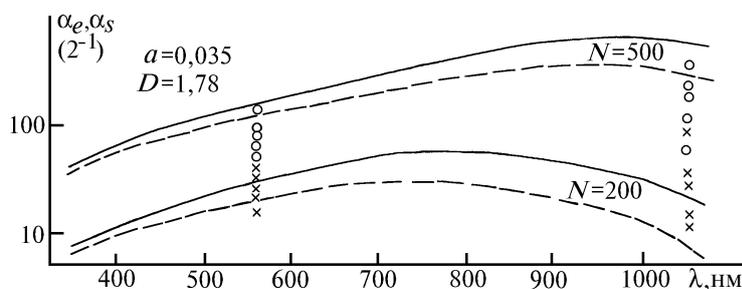


Рис. 3. Сравнение результатов экспериментальных измерений (значки) с расчетными оценками (кривые) коэффициентов ослабления (сплошные линии и кружки) и рассеяния (штриховые линии и крестики) дымовых частиц

1. И в л е в Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. 1982. Л.: Изд-во ЛГУ. 359 с.
2. Ф р а к т а л ы в ф и з и к е. (Труды VI Междунар. симпозиума по фракталам в физике. (МЦТФ, Триест, Италия, 9 – 12 июля 1985). Под ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. 1988. М.: Мир, 672 с.
3. M a n d e l b r o t B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Fransisco: Freeman, 1982.
4. M e a k i n P. // CRC Critical Reviews in Solid State and Material Science. 1979. V. 13. P. 143.
5. C o l b e c k I., H a r d m a n E. J., H a r r i s o n R. M. // J. Aerosol Sci. 1989. V. 20. N 5. P. 765–774.
6. А н д р е е в С. Д., М и х а й л о в Е. Ф., К и с е л е в А. А. Исследования оптических характеристик агрегатов с фрактальной структурой на основе сажи. // Проблемы физики атмосферы. Изд-во СПбГУ, 1995. Вып. 20. С. 222–229.
7. B e r r y M. V., P e r s i v a l I. G. // Optical properties of fractals. Optica Acta. 1986. V. 33. N 5. P. 577–591.
8. И в л е в Л. С., А н д р е е в С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 356 с.
9. C o l b e c k I., H a r r i s o n R. M. // Atmos. Envir. 1986. V. 20. N 9. P. 1673–1681.
10. A s k e r m a n T. P., T o o n O. B. // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 9. P. 3661–3668.

Институт физики при Санкт-Петербургском  
государственном университете

Поступила в редакцию  
8 сентября 1994 г.

S. D. Andreyev, L. S. Ivlev, E. F. Mikhailov, A. A. Kiselev. **Optical Characteristics of Smoke Particles.**

Smoke particles can be regarded as aggregates of fractal structure of small soot particles. A model of a smoke particle is proposed based on results of such aggregates study; and the calculations of extinction, scattering, and back scattering coefficients are performed. The simulation results furnish a qualitative explanation of optical properties of smokes of various types.