

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЕЙ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ СПЕКТРА 0,3 ÷ 15 МКМ.

Ч. 2. МОДЕЛЬ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЕЙ

Обсуждается выбор значений характеристик микроструктуры, используемых для расчетов оптических параметров атмосферных аэрозолей. Приведены соответствующие данные для описания функций распределения по размерам частиц основных фракций аэрозолей приземного слоя атмосферы, значений комплексного показателя преломления в области спектра 0,3 ÷ 15 мкм и описана процедура учета трансформации аэрозолей при изменениях влажности воздуха.

Теоретические расчеты оптических характеристик дисперсной системы предполагают знание таких ее характеристик, как концентрация частиц, функция их распределения по размерам, спектральные значения оптических констант вещества, образующего частицы. В условиях реальной атмосферы, когда функция распределения может трансформироваться под влиянием постоянно меняющейся влажности воздуха и в результате воздействия многочисленных источников и стоков аэрозольных частиц, необходимо описание этих механизмов. Кратко рассмотрим перечисленные здесь характеристики.

1. Распределение частиц по размерам и их концентрация

В настоящее время общепринятым является представление, что частицы атмосферных аэрозолей разного происхождения различаются по своим свойствам и сравнительно слабо взаимодействуют между собой. На основе такого предположения функция распределения по размерам частиц реальных атмосферных аэрозолей представляется в виде суммы функций распределения, описывающих отдельные фракции. Не останавливаясь здесь на конкретных вопросах, связанных с проблемами генерации и трансформации частиц отдельных фракций, отметим только, что в ходе исследований оптических констант атмосферных аэрозолей [1] был сделан вывод об устойчивом существовании трех основных фракций частиц, принципиально различающихся по своему составу и физико-химическим свойствам.

При некоторых в той или иной мере специфических условиях в составе аэрозолей наблюдается присутствие и других фракций частиц, но эти три основные фракции, характеризующиеся средними размерами частиц $r_{01} \cong 0,03$, $r_{02} \cong 0,3$ и $r_{03} \cong 1$ мкм, обнаруживаются в составе аэрозолей приземного слоя атмосферы во всех случаях. Выводы [1] как относительно значений комплексного показателя преломления вещества аэрозольных частиц, так и в отношении оценки средних размеров частиц отдельных фракций не противоречат литературным данным.

Для описания распределения частиц по размерам используются различные аналитические выражения. Их конкретный выбор определяется достаточно субъективными причинами – соображениями удобства, физической обоснованности (правильнее, по-видимому, говорить о представлениях отдельных авторов о механизмах генерации соответствующих частиц) и, наконец, господствующими в данный период представлениями. Так, в течение длительного времени многие исследователи использовали распределение Юнге (частный случай степенного закона), хотя еще при его формулировке было достаточно четко установлено, что это распределение справедливо в среднем (приблизительно в 40% случаев наблюдений) для диапазона размеров частиц $0,1 \leq r \leq 1$ мкм стратосферных аэрозолей [2]. В настоящее время широко используются различные модификации логнормального распределения [3]. Этот вид функции распределения справедлив для дисперсных систем, образующихся в процессе дробления ве-

щества, но его применимость для описания, например, распределения по размерам продуктов конденсации – процесс образования аэрозольных частиц, имеющий важное значение в условиях реальной атмосферы, – сомнительна.

Любые аналитические выражения, используемые для описания функции распределения частиц по размерам, являются аппроксимацией экспериментальных данных. Поэтому, обсуждая применимость того или иного способа аналитического описания функции распределения, необходимо, прежде всего, анализировать исходные экспериментальные данные.

Спектр размеров частиц атмосферных аэрозолей чрезвычайно широк. Даже если ограничиваться рассмотрением только атмосферных дымок с точки зрения изучения их оптических свойств, диапазон размеров охватывает 4-5 порядков величины – от 10^{-3} до $10^1 \div 10^2$ мкм. Не существует методов, позволяющих одновременно и единообразно измерять концентрацию частиц в столь широком диапазоне размеров. Положение усугубляется также тем обстоятельством, что счетная концентрация больших ($0,2 \leq r \leq 1$ мкм) и гигантских ($r \geq 1$ мкм) частиц, как правило, резко убывает с увеличением размеров частиц. Это приводит к тому, что на практике функция распределения частиц по размерам определяется либо в ограниченном интервале размеров, либо для ее измерений используется несколько разных методов.

Практически все реально существующие методы измерений обеспечивают получение относительно надежной информации о функции распределения (с точностью до $10 \div 15\%$) в диапазонах размеров частиц, достигающих приблизительно одного порядка величины. Задача метрологического обеспечения аэрозольных измерений до настоящего времени в сколь угодно полном объеме не решена. При представлении об атмосферных аэрозолях как о совокупности набора независимых фракций конкретный выбор вида функций распределения для отдельных фракций вообще допускает практически произвольное решение. Сказанное иллюстрируется рис. 1, где экспериментально определенное распределение частиц по размерам аппроксимируется различными аналитическими выражениями.

Как видно из рис. 1, *a*, в области максимума одномодального распределения принципиально разные аналитические функции распределения согласуются удовлетворительно – расхождения между ними порядка погрешности измерений, но на расстояниях порядка $(3 \div 5)r_0$ различия между ними существенно возрастают. Как показывает практика, в интервале изменения размеров частиц, составляющем приблизительно порядок величины, варьируя параметры функции распределения (последние при этом рассматриваются как параметры подгонки), всегда можно описать результаты экспериментальных измерений с помощью нескольких аналитических выражений с приблизительно одинаковой точностью, сравнимой с погрешностью измерений. В случае, когда для описания реального распределения используется комбинация нескольких аналитических выражений, возможности выбора их конкретного вида существенно расширяются (рис. 1, *b*).

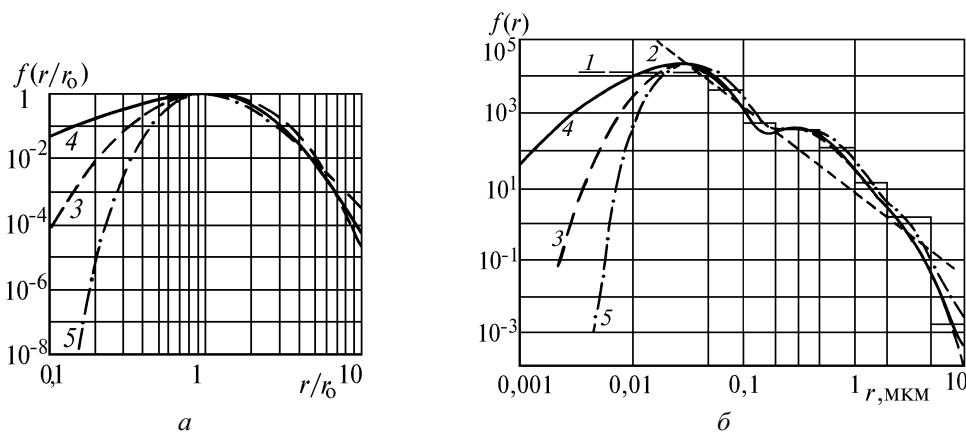


Рис. 1. Аппроксимация функции распределения аэрозольных частиц по размерам различными аналитическими функциями: *a* – одномодальное распределение; *b* – полимодальное распределение по размерам. Кривая 1 – экспериментальные данные (гистограмма); 2 – распределение Юнге; 3 – логнормальная функция ($\sigma = 1,86$); 4 – гамма-функция ($\nu = 3,8$; $\gamma = 1,9$); 5 – гамма-функция с отрицательными степенями свободы ($\nu = -6$; $\gamma = 1,27$)

При расчетах оптических характеристик аэрозолей очень важен вопрос о выборе граничных значений интервалов размеров частиц и шага интегрирования по размерам [4]. Эта проблема имеет два аспекта. С одной стороны, при расчетах необходимо учитывать вклад всех частиц, описываемых выбранной функцией распределения, но, учитывая трудоемкость процедуры расчетов, всегда желательно максимально сократить рассматриваемый диапазон размеров. С этой точки зрения, касающейся прежде всего проблем организации процедуры вычислений, задачу выбора граничных значений можно считать решенной – выработан определенный, в значительной степени общепринятый, набор критериев такого выбора. С другой стороны, как уже отмечалось выше, в основе всех аналитических функций распределения лежат эмпирические результаты, и их использование вне диапазона размеров частиц, охваченного экспериментальными исследованиями, может приводить к значительным ошибкам (см. рис. 1, а).

В то же время различные оптические характеристики аэрозолей разным образом зависят от дисперсности частиц, что позволяет при наличии достаточно полного набора экспериментально определенных оптических характеристик значительно ограничить произвол в оценке вида функций распределения и вероятных значений параметров распределения. Однако даже в видимой области спектра, где принципиально доступны для измерения все элементы матрицы рассеяния, реализация такого комплекса измерений представляет сложную проблему. При проведении расчетов оптических характеристик дисперсных систем проблема оптимальности выбора шага интегрирования полидисперсного распределения имеет не менее важное значение, чем выбор граничных значений интервала изменения размеров частиц; эти вопросы подробно рассматриваются в [4, 5].

В дальнейшем для описания распределения по размерам частиц отдельных фракций аэрозолей используется гамма-распределение с отрицательными степенями свободы

$$\frac{dN}{dr} = a r^{-\nu} \exp\left(-b \frac{I}{r^\gamma}\right) \quad (1)$$

при значениях $\nu = 6$ и $\gamma = 1$.

2. Комплексный показатель преломления вещества аэрозольных частиц

Необходимость учета спектральной зависимости комплексного показателя преломления аэрозольного вещества – т.е., иными словами, необходимость учета эффектов, связанных с аэрозольным поглощением оптического излучения – в настоящее время является общепринятой, однако данные по величинам комплексного показателя преломления сравнительно немногочисленны и противоречивы. Реально такого рода данные получают двумя путями: экспериментально, в результате измерений коэффициентов поглощения проб атмосферных аэрозолей, или расчетным путем, задаваясь определенной моделью состава частиц и значениями показателя преломления соответствующих веществ.

Экспериментальные исследования оптических констант вещества атмосферных аэрозолей в течение последних 10–15 лет проводятся достаточно интенсивно, но получаемые результаты противоречивы. С одной стороны, структура спектра поглощения аэрозольного вещества (положение основных полос поглощения, приблизительные оценки соотношения их интенсивностей и т.д.), по данным отдельных исследователей, (см. [4, 9]) оказывается весьма устойчивой. С другой стороны – количественные оценки как вещественной, так и мнимой части комплексного показателя преломления различаются, иногда существенно [6]. Более того, различаются даже оценки природы многих из регистрируемых полос поглощения. Так, практически всегда наблюдаемую в ИК-спектрах поглощения полосу в области $\lambda \approx 9,5$ мкм одни исследователи связывают с присутствием в составе аэрозолей сульфатов (иногда даже – конкретно $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), а другие приписывают ее силикатам или даже органическим веществам.

Вопрос о природе отдельных полос поглощения может быть решен сравнительно просто – при использовании фракционирования аэрозолей по составу, и одно из возможных решений этой проблемы описано в [1, 4, 7, 8]. В то же время противоречивость количественных результатов соответствующих измерений имеет более принципиальный характер, поскольку она связана не только с естественно возникающими сложностями получения образцов атмосферных аэрозолей, содержащих достаточное для проведения надежных количественных измерений количество вещества – что само по себе представляет сложную экспериментальную зада-

чу, – но и с тем обстоятельством, что многие проблемы оптики дисперсных сред до настоящего времени не решены. Некоторые из существующих здесь проблем на полуэмпирическом уровне рассмотрены в [8, 9], и результаты этих исследований позволяют, по крайней мере, качественно объяснить многие из наблюдавшихся эффектов. По мнению авторов настоящего исследования, данная проблема может быть в значительной степени решена в результате применения представлений теории фрактальных систем и их оптических свойств [10].

Значительная доля данных о величинах комплексного показателя преломления $\tilde{m}(\lambda) = n(\lambda) - i k(\lambda)$ вещества аэрозольных частиц получена расчетным путем на основе определенных представлений о составе частиц и данных о значениях $\tilde{m}(\lambda)$ отдельных веществ. Подобный подход встречает возражения по двум причинам – с одной стороны, вызывает сомнения возможность представления аэрозольных частиц как частиц, состоящих из однородной смеси разнообразных веществ, а с другой – вряд ли возможно описать все многообразие состава аэрозолей различного происхождения, используя ограниченный набор конкретных соединений. По-видимому, оптимальный путь решения этой проблемы предложен в одном из первых исследований такого рода [9, 11], где в качестве компонент смеси, образующей частицы аэрозолей, рассматривались не конкретные минералы, а типы соединений, обладающих достаточно устойчивыми и характерными оптическими свойствами. Используемая здесь модель оптических констант вещества аэрозольных частиц отдельных фракций, основывающаяся на результатах экспериментальных исследований [1, 6–9, 11, 12] и расчетах, также в значительной степени использует принципы, предложенные в [7, 9]. Представляется, что предложение об однородности смеси веществ, образующих отдельные фракции аэрозолей, при всей его искусственности может быть достаточно работоспособным. Оценки возможных вариаций эффективных значений $\tilde{m}(\lambda)$ для случая, когда частицы моделируются двуслойными сферами, подтверждают такой вывод [1].

Модельные значения комплексного показателя преломления вещества частиц отдельных фракций аэрозолей, используемые при дальнейших расчетах, приведены в таблице. Значения \tilde{m} воды брались из [13].

Таблица 1

Комплексный показатель преломления вещества основных фракций аэрозолей $\tilde{m}(\lambda) = n(\lambda) - i k(\lambda)$

λ , мкм	Фракции							
	I		II		III		Органические вещества	
	n	k	n	k	n	k	n	k
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,30	1,572	0,0091	1,653	0,0055	1,590	0,0015	1,460	0,055
0,325	1,572	0,0091	1,653	0,0054	1,588	0,0014	1,490	0,048
0,35	1,571	0,0091	1,653	0,0053	1,587	0,0012	1,492	0,044
0,375	1,571	0,0091	1,653	0,0052	1,586	0,0010	1,496	0,041
0,40	1,570	0,0091	1,653	0,0051	1,585	0,0008	1,497	0,041
0,425	1,570	0,0091	1,653	0,0051	1,583	0,0006	1,502	0,046
0,45	1,570	0,0091	1,653	0,0050	1,581	0,0004	1,509	0,042
0,475	1,570	0,0091	1,653	0,0050	1,580	0,0003	1,517	0,060
0,50	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,579	0,0002	1,543	0,042
0,525	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,578	0,0002	1,537	0,027
0,55	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,577	0,0002	1,530	0,016
0,575	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,576	0,0001	1,528	0,025
0,60	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,575	0,0001	1,527	0,027
0,625	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,574	0,0001	1,525	0,021
0,65	1,569	0,0091	1,652	0,0050	1,573	0,0001	1,524	0,021
0,675	1,569	0,0091	1,651	0,0050	1,572	0,0001	1,529	0,022
0,70	1,569	0,0091	1,651	0,0050	1,570	0,0000	1,531	0,020
0,75	1,569	0,0091	1,650	0,0050	1,567	0,0000	1,530	0,017
0,80	1,568	0,0091	1,650	0,0050	1,565	0,0000	1,526	0,011
0,85	1,568	0,0091	1,649	0,0050	1,562	0,0000	1,526	0,008
0,90	1,567	0,0091	1,649	0,0050	1,559	0,0000	1,525	0,006
0,95	1,565	0,0091	1,648	0,0051	1,556	0,0000	1,523	0,005
1,00	1,563	0,0091	1,648	0,0051	1,554	0,0000	1,521	0,004
1,1	1,560	0,0091	1,647	0,0052	1,552	0,0000	1,518	0,0001
1,2	1,557	0,0092	1,647	0,0052	1,549	0,0000	1,514	0,0012
1,3	1,555	0,0093	1,646	0,0060	1,547	0,0000	1,512	0,0001

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,4	1,553	0,0095	1,646	0,0068	1,545	0,0000	1,509	0,0003
1,5	1,552	0,0105	1,645	0,0072	1,540	0,0000	1,507	0,0004
1,6	1,551	0,0113	1,644	0,0076	1,537	0,0000	1,504	0,0002
1,7	1,550	0,0115	1,644	0,0082	1,535	0,0000	1,503	0,0003
1,8	1,549	0,0115	1,643	0,0088	1,533	0,0000	1,499	0,0000
1,9	1,548	0,0119	1,643	0,0094	1,530	0,0000	1,496	0,0000
2,0	1,546	0,0125	1,642	0,0100	1,528	0,0001	1,492	0,0000
2,2	1,538	0,0134	1,641	0,0120	1,522	0,0000	1,481	0,0031
2,4	1,538	1,0172	1,640	0,0141	1,517	0,0000	1,472	0,0148
2,6	1,527	0,0211	1,630	0,0181	1,509	0,0001	1,465	0,0118
2,8	1,492	0,0575	1,608	0,0456	1,499	0,0079	1,447	0,0120
2,9	1,507	0,0760	1,603	0,0732	1,492	0,0112	1,426	0,0123
3,0	1,561	0,0945	1,646	0,0760	1,508	0,0139	1,370	0,0133
3,2	1,596	0,0674	1,665	0,0512	1,510	0,0038	1,237	0,0087
3,4	1,602	0,0380	1,678	0,0215	1,502	0,0090	1,665	0,323
3,6	1,590	0,0286	1,653	0,0199	1,492	0,0009	1,734	0,120
3,8	1,580	0,0194	1,644	0,0180	1,481	0,0002	1,602	0,371
4,0	1,570	0,0193	1,635	0,0179	1,471	0,0002	1,578	0,0123
4,2	1,560	0,0194	1,628	0,0180	1,460	0,0003	1,547	0,0123
4,4	1,552	0,0194	1,618	0,0179	1,446	0,0005	1,536	0,0146
4,6	1,550	0,0204	1,611	0,0180	1,429	0,0007	1,517	0,0031
4,8	1,540	0,0208	1,598	0,0180	1,412	0,0008	1,491	0,0000
5,0	1,522	0,0207	1,591	0,0180	1,386	0,0006	1,464	0,0000
5,2	1,521	0,0195	1,579	0,0179	1,363	0,0005	1,461	0,0344
5,4	1,506	0,0196	1,566	0,0180	1,324	0,0009	1,439	0,047
5,6	1,491	0,0227	1,550	0,0200	1,280	0,0018	1,386	0,040
5,8	1,480	0,0301	1,544	0,0291	1,199	0,0051	1,360	0,030
6,0	1,461	0,0503	1,514	0,0453	1,101	0,0436	1,156	0,034
6,2	1,451	0,0476	1,453	0,0427	1,075	0,0445	1,563	0,418
6,5	1,441	0,0422	1,403	0,0415	1,024	0,0457	1,371	0,584
6,8	1,280	0,371	1,280	0,361	1,158	1,321	1,794	0,554
7,0	1,503	0,503	1,527	0,432	1,820	1,461	1,965	0,518
7,5	1,588	0,0692	1,559	0,0708	1,930	0,217	1,834	0,083
7,8	1,412	0,0218	1,414	0,0748	1,578	0,115	1,711	0,0192
8,0	1,314	0,0256	1,269	0,0178	1,369	0,120	1,650	0,0113
8,5	1,064	0,333	1,186	0,597	1,278	0,637	1,605	0,141
8,7	1,152	0,682	1,219	0,741	1,325	0,663	1,559	0,039
9,0	1,711	1,012	1,648	1,234	1,353	0,883	1,501	0,195
9,2	2,086	0,652	2,165	1,084	1,474	1,140	1,647	0,224
9,5	2,047	0,464	2,336	0,598	2,597	0,996	1,554	0,396
9,7	2,012	0,353	2,297	0,361	2,313	0,397	1,805	0,315
9,8	1,991	0,252	2,256	0,254	2,213	0,330	1,824	0,222
10,0	1,904	0,124	2,135	0,126	2,100	0,234	1,776	0,120
10,2	1,847	0,099	2,027	0,091	1,977	0,189	1,719	0,0841
10,4	1,788	0,95	1,994	0,080	1,892	0,140	1,680	0,753
10,6	1,746	0,099	1,866	0,078	1,804	0,110	1,642	0,0668
10,8	1,698	0,107	1,805	0,088	1,673	0,140	1,594	0,0647
11,0	1,668	0,131	1,747	0,118	1,534	0,194	1,568	0,149
11,3	1,714	0,148	1,678	0,234	1,536	0,248	1,589	0,137
11,5	1,766	0,173	1,780	0,330	1,996	0,818	1,575	0,320
12,0	1,691	0,124	1,753	0,229	1,718	0,191	1,841	0,118
12,5	1,662	0,163	1,710	0,270	1,474	0,509	1,663	0,0081
13,0	1,681	0,194	1,786	0,297	1,888	0,376	1,600	0,0482
13,5	1,658	0,172	1,876	0,243	1,689	0,257	1,542	0,0728
13,9	1,618	0,207	1,751	0,435	1,542	0,323	1,495	0,118
14,5	1,704	0,212	1,795	0,296	1,696	0,390	1,469	0,765
15,0	1,648	0,234	1,768	0,316	1,652	0,423	1,910	0,672

3. Влияние влажности воздуха на микрофизические характеристики и эффективные значения комплексного показателя преломления вещества аэрозольных частиц

Одним из параметров состояния атмосферы, определяющих трансформацию практически всех свойств атмосферных аэрозолей, является влажность воздуха. С точки зрения оптических свойств аэрозолей это влияние реализуется двояким образом. Изменение влажности воздуха вызывает трансформацию спектра размеров аэрозольных частиц. Конкретные механизмы это-

го явления до конца не ясны. Большинство исследователей полагает, что изменение размеров частиц происходит вследствие конденсации водяного пара на поверхности частиц.

В [14] рассматривается дополнительный механизм воздействия влажности на структуру аэрозолей – предлагается учитывать влияние увлажнения поверхности частиц на скорость их коагуляционного роста и в то же время – облегчение условий конденсации влаги в аэрозолях, образующихся между коагулирующими частицами вследствие капиллярного эффекта, что ведет к резкому увеличению количества воды в составе частиц (конденсационно-коагуляционный механизм).

Каков бы ни был конкретный механизм взаимодействия частиц аэрозолей с атмосферной влагой, изменение количества воды на поверхности частицы (или в ее составе) ведет, помимо трансформации спектра размеров частиц, к изменению эффективных значений комплексного показателя преломления. Несомненно также, что изменение влажности должно воздействовать на отдельные механизмы, определяющие процессы генерации и стока частиц аэрозолей. Если первый комплекс процессов изучался как в естественных, так и в лабораторных условиях (обзор основных результатов подобных исследований содержится, например, в работах [14, 15]), то о механизмах воздействия влажности на процессы генерации и стока аэрозолей можно говорить лишь предположительно и, в значительной степени, умозрительно. Можно ожидать, что сравнение результатов расчетов оптических характеристик аэрозолей с учетом процессов трансформации аэрозольных частиц с данными комплексных – микрофизических и оптических – экспериментальных измерений может привести к получению некоторой полезной информации относительно подобных эффектов.

В используемых здесь расчетах для описания зависимости от влажности размеров аэрозольных частиц используется полуэмпирическая формула Кастена [16]:

$$r(f) = r(f_0) \left(\frac{1-f_0}{1-f} \right)^{-\delta}, \quad (2)$$

где f – относительная влажность воздуха (доли единицы); δ – эмпирическая постоянная. Значения постоянной δ определялись экспериментально для сравнительно широкого круга соединений, обнаруживаемых в составе атмосферных аэрозолей. В соответствии с предполагаемым составом частиц отдельных фракций аэрозолей в настоящем исследовании приняты значения $\delta = 0,32; 0,18$ и $0,08$ для фракций 1, 2 и 3 соответственно.

Поскольку размеры частиц при изменениях влажности воздуха согласно (2) изменяются за счет появления водной оболочки, нетрудно определить количество воды в зависимости от влажности. Изменения показателей преломления и поглощения рассчитываются для соответствующей смеси (вещество аэрозольных частиц и вода) согласно [17]. Не представляет особой сложности учет на этой основе зависимости от влажности оптических свойств трех основных выделенных фракций аэрозолей, так же как и учет, например, жидкокапельной фракции, которая может активно участвовать в формировании оптических свойств атмосферных дымок в прибрежных зонах. В то же время относительно трансформации в условиях меняющейся влажности физико-химических свойств фракции мелкодисперсных частиц, состоящих из органических веществ, в настоящее время сказать что-либо определенное практически невозможно [18].

Учет зависимости от влажности свойств аэрозолей промышленного происхождения, которые во многих случаях практически полностью определяют локальные оптические характеристики атмосферы, также вызывает существенные затруднения. Однако если в случае аэрозолей органического состава принципиальные сложности обусловлены слабой изученностью процесса, практически полным отсутствием экспериментальных данных, то для аэрозолей промышленного происхождения эти сложности связаны в первую очередь с многообразием форм промышленного аэрозольного загрязнения атмосферы, что на практике приводит к необходимости соответствующих исследований и моделирования каждого конкретного случая.

1. Андреев С. Д. // Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. Вып. 19. С. 46–51.
2. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. / М.: Мир, 1965. 424 с.
3. Маров М. П., Шари В. П., Ломакина Л. Д. Оптические характеристики модельных аэрозолей атмосферы Земли. / М.: Изд-во ИПМ АН СССР, 1989. 229 с.
4. Ивлев Л. С., Андреев С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. / Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 359 с.
5. Ивлев Л. С., Янченко Е. Л. // Пробл. физ. атмосф. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971. Вып.9. С.91.

6. Адикс Т. Г. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 1. С. 16–24.
7. Ивлев Л. С., Попова С. И. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1972. N 5. С. 91–97.
8. Ивлев Л. С., Попова С. И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1973. Т. 9. N 3. С. 1034–1043.
9. Попова С. И. Определение оптических постоянных атмосферного аэрозоля и некоторые его оптические характеристики. Автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук. Л.: ЛГУ, 1974. 21 с.
10. Андреев С. Д., Михайлов Е. Ф., Киселев А. А. // Пробл. физ. атмосф. 1994. СПб: Изд-во СПбГУ. Вып. 20. С. 222–229.
11. Ивлев Л. С., Попова С. И. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1974. N 5. С. 11–15.
12. Андреев С. Д., Ивлев Л. С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. N 9. С. 907–916.
13. Hale G. M., Querry M. R. // Appl. Opt. 1973. V. 19. N 4. P. 555–563.
14. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 364 с.
15. Hänel G. // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
16. Kasten F. // Tellus. 1969. V. 21. N 5. P. 631–635.
17. Hänel G. // Tellus. 1968. V. 20. N 3. P. 371–379.
18. Bullrich K., Hänel G. // Pageoph. 1978. V. 116. N 2–3. P. 293–301.

Институт физики при Санкт-Петербургском
государственном университете

Поступила в редакцию
8 сентября 1994 г.

S. D. Andreev, L.S. Ivlev. Simulation of Optical Characteristics of Atmospheric Ground Layer Aerosol within 0.3–15 μm Spectral Range. P. 2. Model of Aerosol Content and Structure.

Selection of values of microstructure characteristics is discussed in the paper, which are used in calculation of optical characteristics of atmospheric aerosols. The corresponding data are presented to describe the size distribution function for particles of basic aerosol fractions in the nearground atmospheric layer. As well the values of complex index of refraction for 0.3–15 μm region are presented, and the procedure allowing for aerosol transformation at air humidity variations is described.