

**А.В. Васильев, Л.С. Ивлев**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

На основе аппроксимации результатов расчетов характеристик рассеяния света ансамблем однородных полидисперсных сферических частиц предложена спектральная модель аэрозольной индикатрисы рассеяния света. Параметрами модели для заданной длины волны и типа аэрозольных частиц (определяемого комплексным показателем преломления вещества частиц) являются объемный коэффициент аэрозольного рассеяния и концентрация аэрозольных частиц. Использование этих параметров позволяет моделировать зависимость индикатрисы рассеяния от метеорологических параметров, в частности от дальности видимости и влажности воздуха. Показано хорошее соответствие характеристик классов модельных и экспериментальных индикатрис при использовании классификации индикатрис, полученной по данным измерений.

При решении задач расчета поля излучения в атмосфере Земли с учетом рассеяния и особенно при решении обратных задач дистанционного зондирования атмосферы появляется необходимость параметризации аэрозольной модели атмосферы. Особые сложности вызывает параметризация индикатрисы рассеяния света, так как аппроксимация индикатрис рассеяния, рассчитанных для ансамбля аэрозольных частиц, искусственно подобранными аналитическими функциями (обычно это модификации классической функции Хэньи–Гринштейна) является очень грубой. Задание же индикатрисы в форме таблицы значений по углам рассеяния или в форме таблицы коэффициентов разложения по полиномам Лежандра с привязкой ее к параметрам модели (длине волны, высоте, типу аэрозолей, влажности и т.п.) делает модель слишком громоздкой для практического использования.

В [1] авторами предложен подход к моделированию и параметризации индикатрисы рассеяния света ансамблем сферических однородных частиц, основанный на использовании в качестве параметров как микрофизических величин ( комплексного показателя преломления частиц), так и оптических характеристик (среднего сечения рассеяния частиц ансамбля). Такой подход позволяет легко «привязать» индикатрису рассеяния к таким стандартно используемым параметрам аэрозольных моделей атмосферы, как метеорологическая дальность видимости, тип аэрозольного вещества, влажность воздуха.

Как показано в [1], для средних по ансамблю аэрозольных частиц зависимость между сечением направленного рассеяния  $S(\lambda, n, \kappa, \gamma)$  и сечением рассеяния  $s(\lambda, n, \kappa)$  хорошо аппроксимируется формулой

$$\ln S(\lambda, n, \kappa, \gamma) = a(\lambda, n, \kappa, \gamma) + b(\lambda, n, \kappa, \gamma) \cdot \ln s(\lambda, n, \kappa), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $n$  и  $\kappa$  — соответственно вещественная и мнимая части показателя преломления аэрозольного вещества;  $\gamma$  — угол рассеяния. Среднее сечение рассеяния  $s(\lambda, n, \kappa)$  легко рассчитать, зная объемный коэффициент аэрозольного рассеяния  $\sigma$  и концентрацию аэрозольных частиц  $N$ :

$$s = 10^{-5} \sigma / N, \quad (2)$$

где  $\sigma$  измеряется в  $\text{км}^{-1}$ ,  $N$  в  $\text{см}^{-3}$ , а  $s$  в  $\text{см}^2$ . Индикатриса рассеяния  $x(\gamma)$  есть нормированный коэффициент направленного рассеяния

$$x(\gamma) = S(\gamma) / \left[ \frac{1}{2} \int_0^\pi S(\gamma) \sin \gamma d\gamma \right]. \quad (3)$$

Задача построения модели индикатрисы рассеяния сводится к расчету коэффициентов  $a$  и  $b$  в формуле (1). Методика расчета этих коэффициентов изложена в [1]. Отметим только, что использование понятий «эффективный радиус» и «эффективная ширина» функции распределения аэрозольных частиц по размерам позволяет исключить из рассмотрения зависимость от конкретного вида функции распределения. Так, при вычислении коэффициентов  $a$  и  $b$  использованы 4 типа распределений: логнормальное, Юнге, гамма- и обратное гамма-распределение, всего 128 комбинаций параметров (подробности в [1]).

Следовательно, предполагаемая модель индикатрисы рассеяния имеет пять параметров: длину волны  $\lambda$ ; вещественную часть показателя преломления  $n$ ; мнимую часть показателя преломления  $k$ ; объемный коэффициент аэрозольного рассеяния  $\sigma$ ; концентрацию частиц  $N$ .

Последние два параметра являются зависимыми, так как связаны соотношением (2). Наличие в качестве параметра модели концентрации аэрозольных частиц  $N$  является ее недостатком, однако полностью избавиться от микрофизических характеристик аэрозоля при условии сохранения достаточной точности аппроксимации реальных индикатрис вряд ли возможно. Влажность воздуха не является явным параметром модели, поскольку при трансформации спектров размеров частиц с изменением влажности меняются величины  $s$  и  $S$  в формуле (1), но не коэффициенты  $a$  и  $b$ , которые в предлагаемой модели не зависят от конкретного вида функции распределения аэрозольных частиц по размерам и ее параметров. В то же время влияние влажности будет сказываться на изменении параметров  $n$ ,  $k$  и  $\sigma$ , т.е. в неявном виде оно учитывается в модели, простейший пример такого учета приведен ниже.

Вычисления коэффициентов  $a$  и  $b$  проведены для 37 углов рассеяния: от 0 до 180° с шагом 5°; для 37 длин волн в диапазоне от 0,2 до 15,0 мкм; для 8 значений вещественной части показателя преломления от 1,33 до 2,20 и для 8 значений мнимой части показателя преломления от 0 до 0,1. Как показано в [1], зависимость  $a$  и  $b$  от  $n$  и  $k$  носит сложный характер и для широкого диапазона изменений параметров не имеет смысла аппроксимировать ее аналитически. Поэтому вычисленные значения  $a$  и  $b$  при практической реализации модели на ЭВМ хранятся в виде файла. Этот файл записан в специальном сжатом формате размером чуть более 1 Мбайта, поэтому его хранение и использование не являются проблемой для современных ЭВМ. Структура файла такова, что позволяет выбирать данные из него в режиме прямого доступа, что делает время вычисления индикатрисы несущественно малым. Практическая реализация описываемой модели на ЭВМ состоит из файла с данными и компьютерной подпрограммы, которая по значениям указанных выше пяти параметров вычисляет по формулам (1) и (3) аэрозольную индикатрису рассеяния. Для промежуточных значений параметров  $\lambda$ ,  $n$  или  $k$  используется линейная интерполяция по индикатрисам.

В качестве примера использования и одновременно теста предложенной модели приведем сравнение модельных индикатрис с классификацией экспериментально измеренных индикатрис из [2, 3]. В качестве параметров классификации использованы определенные в [2–4] вытянутость (или асимметрия)  $G$  — отношение рассеяния в переднюю полусферу к рассеянию в заднюю полусферу и острота  $p$  — отношение значения индикатрисы для угла 140° к значению для угла 105°. Границы классов выбраны на основе [2–4]. Классы маркируются двумя цифрами, разделенными точкой: цифра до точки (номер класса) соответствует классификации по параметру  $G$ , цифра после точки (номер подкласса) — по параметру  $p$ , при этом границы подклассов выбираются индивидуально внутри каждого класса (имеется слабая зависимость  $p$  от  $G$ ).

При сравнении модельных и экспериментальных индикатрис имеет смысл сравнивать не сами индикатрисы, а характеристики их классов, которыми являются согласно [2–4] метеорологическая дальность видимости и влажность воздуха. Необходимость сравнения характеристик классов, а не самих индикатрис следует из того, что экспериментальные индикатрисы — интегральные по спектру, следовательно, приписать им какую-то длину волны (0,55 мкм) можно лишь приближенно. Кроме того, наша модель имеет (для фиксированной длины волны) еще 4 параметра, поэтому при сравнении с какой-то отдельной индикатрисой их всегда можно «подогнать».

Для сравнения классификаций мы промоделировали полную (аэрозольную плюс молекулярную) индикатрису рассеяния для длины волны 0,55 мкм и для следующих вариаций параметров: вещественная и мнимая части комплексного показателя преломления «сухого» аэрозольного вещества те же, что в модели; влажность воздуха от 0 до 100% с шагом 20%; метеорологическая дальность видимости 1; 3; 7,5; 15; 30; 75; 150 км; концентрация аэрозольных частиц:  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^4$ , 5000, 1000, 500, 100 см<sup>-3</sup> для видимостей 1 и 3 км;  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^4$ , 5000, 1000,

500, 100, 50 см<sup>-3</sup> для видимостей 7,5 и 15 км; 10<sup>4</sup>, 5000, 1000, 500, 100, 50, 10 см<sup>-3</sup> для видимостей 30 и 75 км; 5000, 1000, 500, 100, 50, 10, 5 см<sup>-3</sup> для видимости 150 км. Таким образом, для классификации были смоделированы 18816 индикатрис рассеяния.

Для моделирования зависимости от влажности воздуха была использована простейшая модель: комплексный показатель преломления «влажного» аэрозольного вещества  $m_m$  связан с комплексным показателем преломления  $m_d$  «сухого» аэрозольного вещества по формуле

$$m_m = (1 - 0,01 f)m_d + 0,01 f(1,33 - i0), \quad (4)$$

где  $f$  — относительная влажность воздуха, %.

Объемный коэффициент аэрозольного рассеяния выражается через метеорологическую дальность видимости по формуле

$$\sigma_a = 3,9/v - \sigma_m, \quad (5)$$

где  $v$  — дальность видимости, км;  $\sigma_m$  — объемный коэффициент молекулярного рассеяния, равный 0,012 км<sup>-1</sup>, в приземном слое на длине волны 0,55 мкм.

Результаты классификации модельных индикатрис приведены в таблице, где показаны границы классов и подклассов, характеристики классов, полученные по результатам моделирования: число индикатрис каждого класса  $N$ , диапазон значений дальности видимости  $v$  и влажности  $f$  для каждого класса; характеристики тех же классов для экспериментальных индикатрис по [2, 3]: диапазон значений дальности видимости  $v$  для каждого класса (для класса 3.1 и всех подклассов с номером 2 и более данные о дальности видимости в [2, 3] отсутствуют).

**Результаты классификации модельных индикатрис и сравнение характеристик классов с экспериментальными данными [2, 3]**

Класс	Границы класса		Характеристики класса			
	$G$	$p$	Модель			Эксперимент
			$N$	$f, \%$	$v, \text{ км}$	$v, \text{ км}$
2.0	<1.9		50	0–40	150	75–150
3.0	1.9–2.5	<1.45	1392	0–100	75–150	30–150
3.1	1.9–2.5	>1.45	82	0–100	150	
4.0	2.5–4.0	<1.35	1736	0–100	1–150	15–150
4.1	2.5–4.0	>1.35	1257	0–100	75–150	30–75
5.0	4.0–6.0	<1.35	3063	0–100	1–75	7,5–75
5.1	4.0–6.0	>1.35	744	0–100	30–75	30–75
6.0	6.0–8.0	<1.30	2074	0–80	1–30	3–30
6.1	6.0–8.0	1.30–2.00	1079	0–100	1–75	15–30
6.2	6.0–8.0	>2.00	0			
7.0	8.0–11.5	<1.10	1194	0–80	1–30	1–15
7.1	8.0–11.5	1.10–2.00	1290	0–100	1–30	7,5–15
7.2	8.0–11.5	2.00–6.00	547	0–100	1–30	
7.3	8.0–11.5	>6.00	0			
8.0	11.5–17.0	<1.10	795	0–80	1–15	1–7,5
8.1	11.5–17.0	1.10–2.00	678	0–80	1–30	1–7,5
8.2	11.5–17.0	2.00–5.00	695	0–100	1–30	
8.3	11.5–17.0	5.00–9.00	0			
8.4	11.5–17.0	>9.00	0			
9.0	17.0–25.0	<1.10	425	0–80	1–15	1–7,5
9.1	17.0–25.0	1.10–2.00	330	0–80	1–30	1–3
9.2	17.0–25.0	2.00–3.50	251	0–100	1–7,5	
9.3	17.0–25.0	>3.50	143	0–100	1–3	
10.0	>25.0	<1.10	566	0–80	1–7,5	1–3
10.1	>25.0	1.10–2.00	277	0–80	1–15	1
10.2	>25.0	>2.00	148	0–100	1–7,5	

В результате моделирования удалось получить почти все те классы индикатрис, что наблюдались в экспериментах, за исключением классов 6.2, 7.3, 8.3, 8.4. Отсутствие этих классов объяснимо, так как подобные индикатрисы («острые с максимумом» по [2, 3]) наблюдались в условиях дымок и туманов, т.е. при возможном присутствии в воздухе водяных капель, которые и дают сильный радужный максимум. В нашей модели возможность получения индикатрис для капель и других сверхгигантских частиц не предусмотрена.

Анализ зависимости характеристик классов, полученных в результате моделирования, от дальности видимости и влажности показывает хорошее согласие ее с данными измерений: зависимость от влажности воздуха выражена слабо, зависимость от дальности видимости носит не детерминированный, а статистический характер, т.е. в один класс попадают индикатрисы, полученные для достаточно широкого диапазона дальностей видимости. Согласно [2, 3] индикатрисы подкласса 0 («пологие») характерны для континентальных воздушных масс, а подкласса 1 («острые») — для морских. Классификация на основе моделирования отражает эту зависимость от типа воздушной массы: индикатрисам подкласса 0 соответствует более узкий диапазон изменения влажности воздуха, чем индикатрисам подкласса 1.

Диапазоны значений дальности видимости для классов по результатам моделирования и экспериментальным данным (см. таблицу) для большинства классов согласуются. Учитывая достаточно грубую дискретную сетку дальностей видимости, использованную при моделировании, это согласование можно считать хорошим. Выбирая при моделировании более мелкий шаг сетки по дальности видимости, вводя более подробную зависимость концентрации частиц от дальности видимости, используя более сложную модель зависимости параметров от влажности воздуха и т.д., можно получить более точное совпадение характеристик модельной и экспериментальной классификаций, но по причинам, указанным выше, такая «подгонка» не проводилась. Главное доказательство адекватности модели реальной ситуации в атмосфере — это то, что удалось получить почти все классы индикатрис и что физические зависимости характеристик классов от параметров модели согласуются с наблюдаемыми в эксперименте.

Таким образом, предлагаемая модель может быть использована для получения аэрозольной индикатрисы рассеяния света на заданной длине волны по априорным, измеренным, вычисленным или восстановленным параметрам аэрозольной модели атмосферы, т.е. по комплексному показателю преломления аэрозольного вещества, концентрации аэрозольных частиц и объемному коэффициенту аэрозольного рассеяния.

1. Васильев А.В., Ивлев Л.С. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 6. С. 921–928.
2. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. // Труды ГГО. Вып. 220. 1967. 244 с.
3. Бартенева О.Д., Лактионов А.Г., Аднашкин В.Н., Веселова Л.И. // Проблемы физики атмосферы. 1978. Л.: Изд-во ЛГУ. Вып. 15. С. 27–43.
4. Васильев О.Б., Васильев А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 1. С. 76–89.

Научно-исследовательский  
институт физики Санкт-Петербургского  
государственного университета

Поступила в редакцию  
22 марта 1995 г.

**A. V. Vasilyev, L. S. Ivlev. Numerical Simulation of Spectral Aerosol Scattering Phase Function of Light.**

Based on approximation of results of calculation of light scattering characteristics for homogeneous polymodal spherical particles, spectral model of aerosol scattering phase function is represented. The parameters of this model for specified wavelength and aerosol particles type defined by complex refraction index are aerosol volumetric scattering coefficient and concentration of aerosol particles. These parameters allow one to simulate the dependence of phase function on meteorological parameters such as visibility and relative humidity. Good coincidence between characteristics of classes for model and experimental phase functions was found when the classification was based on measurement data.