

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ ГОРИЗОНТАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ПЛАСТИНКАМИ

А.Р. Сергиенко

Научный руководитель: О.В. Шефер
Томский политехнический университет
E-mail: ars13@tpu.ru

Введение

Определение ослабления (экстинкции) оптического излучения полидисперсными средами связано с решением многих задач. К таким задачам относятся исследование прозрачности атмосферы и водных сред с использованием пассивного и лазерного зондирования [1, 2]. Атмосферные образования как природного, так и антропогенного происхождения играют важную роль в радиационном балансе Земли и влияют на погоду и климат. Частицы разных форм и размеров с различными оптическими и динамическими свойствами обеспечивают различные эффекты излучения, прошедшего через среду. К настоящему времени проблема экстинкции для мелких и крупных хаотически ориентированных частиц широко представлена в научной литературе [1, 2]. Однако характер ослабления преимущественно ориентированными кристаллами, особенно для ИК области спектра, слабо изучен.

Численное представление процесса прохождения излучения через полидисперсные среды связано с выполнением трудоемких расчетов. Чтобы упростить численную модель, но при этом не снизить точность расчетов следует учитывать те особенности светорассеяния, которые дают определяющий вклад в ослабление излучения рассматриваемой средой. Для расчета характеристик экстинкции видимого и ИК излучения в работе рассмотрен ансамбль крупных полупрозрачных горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. Выбор такой модели основан на следующем. Пластинчатый кристалл является примером несферической частицы, позволяющей продемонстрировать ярко выраженные анизотропные свойства рассеивателя. Пластинчатые кристаллы входят практически во все смешанные и ледяные облака и зачастую являются основными в их составе. Крупные преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы обеспечивают определяющий вклад в волновую зависимость ослабления оптического излучения многокомпонентной полидисперсной средой. Пластинка имеет простую форму с точки зрения численной реализации и позволяет разобраться в сложных сплетениях процессов рассеяния системой крупных преимущественно ориентированных кристаллов.

Методика расчета

В данной работе для расчета характеристик экстинкции ансамблем крупных пластинок

использовался метод физической оптики, учитывающий векторную природу излучения. Среди всех крупных преимущественно ориентированных кристаллов по характеру ослабления выделяются преимущественно ориентированные пластинки. Для этой формы кристаллов фактор ослабления может принимать значения из наибольшего интервала от 0 до 4 [3, 4].

Рассмотрим характеристики экстинкции для случая, когда направление распространения волны совпадает с нормалью к плоскости ориентации пластинок. Такая постановка задачи дает возможность наиболее просто выявить общие закономерности взаимодействия волны с системой ориентированных пластинчатых кристаллов. При нормальном падении плоской волны на основание пластинки формулы для сечений ослабления и поглощения, полученные в рамках метода физической оптики, имеют вид:

$$S_{\text{ext}} = 2\pi a^2 (1 - \text{Re}(T)), \quad (1)$$

где T – коэффициент передачи Френеля для плоской волны, нормально падающей на полупрозрачный слой; a – радиус пластинки.

Для дисперсной среды рассматривается интегральная характеристика, такая как коэффициент ослабления (α_{ext}). Коэффициент ослабления является интегралом, подынтегральная функция которого содержит в качестве множителя сечение ослабления для отдельной частицы. Эта характеристика является результатом решения задачи рассеяния волны на отдельной частице. При учете распределения частиц по размерам используется интегральное соотношение

$$\alpha_{\text{ext}} = \int S_{\text{ext}}(a) N(a) da, \quad (2)$$

где $N(a)$ – функция плотности распределения пластинок по размерам. Для большинства атмосферных сред, состоящих из кристаллов, функция распределения $N(a)$ является одномодальной и удовлетворительно аппроксимируется модифицированным гамма-распределением

$$N(a) = C \frac{\mu^{u+1}}{\Gamma(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m}\right)^\mu \exp\left(-\frac{\mu a}{a_m}\right). \quad (3)$$

Здесь a_m – определяющий размер кристалла, соответствующий максимуму функции $N(a)$, μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума, $\Gamma(\mu+1)$ – гамма-функция. Каждая пластинка характеризуется двумя линейными размерами: радиусом, a и толщиной d . Между линейными

размерами пластинчатого кристалла существует функциональная связь $d=f(a)$ [2]. Эта закономерность используется при расчете интегральных соотношений. В данной работе численная модель предусматривает пластинки с различным аспектом отношения a/d . Для анализа данных, как численных, так и экспериментальных, как правило, используют средний радиус частиц $\bar{a} = a_m(1+1/\mu)$. Для большинства облачных кристаллов коэффициент ослабления может быть определен только численно и это связано с выполнением трудоемких расчетов. Существует близкая к реальности модель полидисперсной среды в виде системы горизонтально ориентированных пластинок, для которой удалось получить алгебраическую формулу для коэффициента ослабления. При этом использовалось модифицированное гамма-распределение частиц по размерам (3) с учетом $d=2.020(2a)^{0.449}$. Сводя интегральное представление коэффициента ослабления (2) к аппроксимационной формуле, в работе [3] получено аналитическое выражение

$$\alpha_{\text{ext}} \approx 2\pi C \frac{\mu+2}{\mu+1} \bar{a}^{-2} \left\{ 1 - \text{Re} \left[t_e / (1 + \chi \cdot k x_2 - i(n-1)k x_2)^{\eta+1} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$t_e = 4\eta / (\eta+1)^2, \quad r_e = (\eta-1)^2 / (\eta+1)^2.$$

Здесь $\eta=n+i\chi$ – комплексный показатель преломления, величины x_1 и x_2 зависят только от параметров модифицированного гамма-распределения частиц по размерам \bar{a} и μ . Это позволяет для любых допустимых значений \bar{a} и μ заранее вычислить x_1 и x_2 . В Таблице 1 представлены расчетные значения x_1 и x_2 , которые соответствуют некоторым реальным параметрам \bar{a} и μ для ледяных пластинок.

Таблица 3 – Константы x_1 (верхняя строка) и x_2 (нижняя строка), определяемые при минимизации методом конфигураций, $\eta=n+i\chi$

\bar{a} , мкм	μ					
	1	2	3	4	5	6
100	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	2.20	1.41	1.05	0.84	0.70	0.60
200	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	3.01	1.92	1.43	1.15	0.96	0.82
300	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	3.61	2.30	1.72	1.38	1.15	0.99
400	17.17	22.2	27.08	32.04	37.02	41.98
	4.10	2.62	1.95	1.57	1.31	1.13
500	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	4.54	2.89	2.16	1.73	1.45	1.25
600	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	4.92	3.14	2.35	1.88	1.57	1.35
700	17.17	22.12	27.08	32.04	37.02	41.98
	5.28	3.37	2.51	2.01	1.68	1.44

Алгебраическая формула позволяет проводить вычисления значений коэффициента ослабления с погрешностью не более 2.5% (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Сопоставительный анализ величины коэффициента ослабления, получаемой

в точных вычислениях и на основе предложенного аналитического приближения, $\eta=n+i\chi$

C=1 л ⁻¹ , $\mu=4$, $a_m=400$ мкм			
λ	α_{ext}	$\bar{\alpha}$	$(\alpha_{\text{ext}} - \bar{\alpha})/\alpha_{\text{ext}} \cdot 10^0\%$
9	1.901·10 ⁶	1.944·10 ⁶	-2.24
9.1	1.937·10 ⁶	1.98·10 ⁶	-2.2
9.2	1.974·10 ⁶	2.017·10 ⁶	-2.12
9.3	2.013·10 ⁶	2.054·10 ⁶	-2
9.4	2.052·10 ⁶	2.09·10 ⁶	-1.86
9.5	2.091·10 ⁶	2.126·10 ⁶	-1.7
9.6	2.129·10 ⁶	2.161·10 ⁶	-1.53
9.7	2.165·10 ⁶	2.194·10 ⁶	-1.35
9.8	2.2·10 ⁶	2.226·10 ⁶	-1.17
9.9	2.233·10 ⁶	2.255·10 ⁶	-0.99
10	2.263·10 ⁶	2.281·10 ⁶	-0.82
10.1	2.29·10 ⁶	2.305·10 ⁶	-0.64
10.2	2.314·10 ⁶	2.325·10 ⁶	-0.47
10.3	2.335·10 ⁶	2.342·10 ⁶	-0.31
10.4	2.353·10 ⁶	2.356·10 ⁶	-0.15
10.5	2.367·10 ⁶	2.367·10 ⁶	0
10.6	2.377·10 ⁶	2.374·10 ⁶	0.14
10.7	2.383·10 ⁶	2.377·10 ⁶	0.27
10.8	2.386·10 ⁶	2.377·10 ⁶	0.39
10.9	2.385·10 ⁶	2.373·10 ⁶	0.5
11	2.38·10 ⁶	2.365·10 ⁶	0.6
11.5	2.3·10 ⁶	2.279·10 ⁶	0.92

Заключение

Предложенное выражение для расчета коэффициента ослабления позволяет количественно оценить влияние микрофизических параметров частиц и их показателя преломления на спектральную зависимость оптических характеристик полидисперсной среды, содержащей крупные горизонтально ориентированные пластинки, при затрате минимальных вычислительных ресурсов. При различных значениях аспекта отношения размеров пластинки и распределения по размерам, применяя соответствующие аппроксимационные выражения могут быть получены аналитические формулы для расчета коэффициента ослабления в реальном масштабе времени.

Список использованных источников

1. Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A., eds. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles (Cambridge U. Press, 2002), p. 445.
2. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
3. Попов А.А., Шефер О.В. Аналитическое выражение коэффициента ослабления излучения кристаллами в виде пластинок // Оптика атмосферы. 1989. – Т.2. – №5. – С.532–536.
4. Shefer O. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2016. – V.178. – P.350–360.