

## МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ МИ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Егоров А.Д.<sup>1</sup>, Косцов В.В.<sup>1</sup>, Калинин Д.В.<sup>1</sup>, Куклин О.А.<sup>1</sup>,  
Потапова И.А.<sup>1</sup>, Хлябич П.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Российский государственный гидрометеорологический университет. г. Санкт-Петербург, Россия. egorovad@rambler.ru

**Аннотация.** В основе модели лежат уравнения расчета показателей преломления, поглощения, объемных коэффициентов поглощения и рассеяния кристаллов льда, а также готовые модели, которые реализованы на языке программирования Python. Выполнен сравнительный анализ данных.

**Ключевые слова:** модель, оптика, зондирование, Python, теория Ми, аэрозоль, кристаллы льда.

Проблема определения дальности видимости и повышения безопасности полетов является одной из основных задач. Поэтому разработка программ, решающих поставленную задачу на современных языках программирования, достаточно важна. Атмосферный воздух, представляет собой аэрозоль и рассеяние света его дисперсной фазой, которая играет в оптике атмосферы важную роль. Эти частицы рассматриваются как центры кристаллизации. Таким образом, зная концентрацию кристаллов в атмосферном воздухе, можно определить концентрацию загрязняющих частиц. В статье рассмотрено применение аэрозольной модели восстановления оптических свойств кристаллов льда по теории Ми. Для этой модели была разработана программа ЯП Python, примененной для вычисления и реализации расчета оптических характеристик.

Численная модель диэлектрических свойств льда позволяет осуществить расчет показателя преломления и показателя поглощения электромагнитных волн в диапазоне частот от 0 до  $6.7 \cdot 10^{15}$  Гц. Показатель преломления электромагнитных волн определяется выражением:

$$n = \left\{ \frac{[(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2]^{0.5} + \varepsilon'}{2} \right\}^{0.5}$$

а показатель поглощения электромагнитных волн определяется выражением:

$$a = \left\{ \frac{[(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2]^{0.5} - \varepsilon'}{2} \right\}^{0.5}$$

где,  $n$  – показатель преломления электромагнитных волн,  $a$  – показатель поглощения электромагнитных волн,  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости,  $\varepsilon''$  – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости.

В диапазоне частот от 0 до  $3.49 \cdot 10^7$  Гц значения относительной диэлектрической проницаемости рассчитываются с помощью теории Дебая по формуле:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f \tau_p)^2}$$

где  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости,  $\varepsilon_{\infty}$  – относительная диэлектрическая проницаемость на высоких частотах, для льда равная 3.1,  $\varepsilon_s$  – относительная диэлектрическая проницаемость на низких частотах,  $f$  – частота электромагнитного поля, Гц,  $\tau_p$  – время релаксации диэлектрической проницаемости.

Значение  $\varepsilon''$  в соответствии с теорией Дебая рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot 2\pi f \tau_p}{1 + (2\pi f \tau_p)^2}$$

Для математического описания взаимодействия излучения с отдельными аэрозолями они моделируются геометрическими телами. Простейшая – однородный шар. Для расчета характеристик взаимодействия электромагнитных волн используется теория Ми. Поэтому, для получения всех необходимых оптических характеристик шара достаточно задать лишь отношение

$$y = 2\pi r / \lambda,$$

где  $r$  – радиус шара,  $\lambda$  – длина волны излучения, а также комплексный показатель преломления (КПП) вещества шара  $m$ .

Здесь вещественная часть КПП – это относительный показатель преломления, а мнимая часть КПП соответствует поглощению излучения веществом.

В процессе работы формулы теории Ми были преобразованы к удобному виду для вычислений. Важно, что реально частицы в атмосфере имеют существенно разные размеры и разную концентрацию по ним [1, 3]. Следовательно, необходимо ввести характеристику аэрозоля, связывающую концентрацию и радиус.

С учетом выше сказанного, была разработана программа на ЯП Python для вычисления и реализации расчета оптических характеристик, с получением результатов детерминированного и стохастического моделирования.

Результатом данной модели является расчет КПП при температуре 273.15 К и длин волн лежащих в диапазоне от 0.3 до 15 мкм, так как в этом диапазоне происходит энергетическое ослабление оптических волн. На основе полученных результатов были построены графики зависимости КПП от длины волны. Получены зависимости коэффициентов показателей преломления и поглощения кристаллов льда от длины волны. Полученные данные совпадают в пределах погрешности с результатами моделей, полученных с помощью различных программных кодов. При написании кода, разница между полученными данными составляет погрешность порядка 0.001% [2].

Используя параметры КПП мнимой и вещественной частей, а также параметры функции распределения частиц по размерам были рассчитаны объемные коэффициенты.

В заключение можно утверждать, что разработанная программа более простая и скоростная, по сравнению с ее аналогами, а модель адекватна и применима для определения загрязнения атмосферы.

#### Литература

1. Довгалюк Ю.А., Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем. — СПб.: НИИХ СПбГУ. 1999. — 194с.
2. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Ленинград Гидрометеоздат. 1986. – 253 с.
3. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики – СПб., 2007. – 152 с.

### MODEL FOR CALCULATING OPTICAL OF ICE CRYSTALS USING THE MIE THEORY, USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

Yegorov A.D.<sup>1</sup>, Kalinichev D.V.<sup>1</sup>, Kostsov V.V.<sup>1</sup>, Kuklin O.A.<sup>1</sup>,  
Potapova I.A.<sup>1</sup>, Khlyabich P.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Russian state hydrometeorological University. St. Petersburg, Russia, egorovad@rambler.ru

**Abstract.** The model is based on the equations of calculation of refractive indices, absorption, volume absorption and scattering coefficients of ice crystals, as well as ready-made models that are implemented in the Python programming language. A comparative analysis of the data of the model is performed.

**Key words:** model, optics, sensing, Python, Mie theory, aerosol, ice crystals.