

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ МЕТАН

Лоскутов В.В.

Научный руководитель Шефер О.В.

Томский политехнический университет, Институт кибернетики
deonold@gmail.com

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется мониторингу поверхностного слоя морской воды. Это обусловлено необходимостью контроля экологической ситуации и установления источника и состава выбросов газообразных соединений, сформированных под водой [1]. Для исследования многочисленных газовой-аэрозольных сред наиболее перспективны оптические методы, основанные на определении характеристик излучения, трансформированного средой.

В данной работе с помощью численных методов устанавливаются особенности спектральной зависимости характеристик ослабления и пропускания оптического излучения. Исследование оптических характеристик среды проводится на диапазоне длин волн от 0.2 до 2.5 мкм, где поглощение водой/льдом пренебрежимо мало.

Формализм расчёта

Для численного исследования оптических характеристик излучения, прошедшего через полидисперсную среду, прежде всего необходимо разработать модель отдельной частицы для адекватного установления зависимости характеристик светорассеяния от параметров падающего излучения и рассеивателя. Результат моделируемого процесса рассеяния зависит от микрофизических и оптических свойств частиц и среды их содержащей.

Решение Ми [2] задачи рассеяния плоской волны на сфере является универсальным и может быть эффективно использовано для моделирования сред с содержанием как мелких, так и крупных частиц различных форм. С помощью теории Ми возможно адекватно описать множество эффектов трансформации излучения для взаимодействия со средой.

Моделирование процесса прохождения оптического излучения через полидисперсные среды связано с выполнением расчётов оптических характеристик. Для дисперсной среды рассматриваются такие интегральные характеристики, как коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния. При учёте распределения частиц по размерам, для определения коэффициентов ослабления, поглощения и рассеяния используются следующие интегральные соотношения:

$$\alpha_{\text{ext}} = \int S_{\text{ext}}(a) N(a) da, \quad (1)$$

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

$$\alpha_{\text{sca}} = \int S_{\text{sca}}(a) N(a) da, \quad (3)$$

где α_{ext} – коэффициент ослабления, α_{abs} – коэффициент поглощения, α_{sca} – коэффициент рассеяния, S_{ext} – сечение ослабления, S_{abs} – сечение поглощения, S_{sca} – сечение рассеяния. Априори в качестве функции распределения частиц по размерам $N(a)$ выбрано модифицированное гамма-распределение [3].

$$N(a) = C \frac{\mu^{\mu+1}}{G(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m}\right)^{\mu} \cdot \exp\left(\frac{-\mu \cdot a}{a_m}\right), \quad (4)$$

где C – концентрация пластинок, a_m – радиус сферы, соответствующий максимуму функции $N(a)$, μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума, $G(\mu+1)$ – гамма функция.

По мере распространения падающего пучка в слое частиц интенсивность затухает по закону (5):

$$I_t = I_1 \exp(-\alpha_{\text{ext}} \cdot h), \quad (5)$$

где h – путь, который проходит излучение в слое. Для расчета функции пропускания среды используется соотношение (6):

$$T = \frac{I_t}{I_1}. \quad (6)$$

Обсуждение результатов расчёта

Было выполнено численное исследование ослабления оптического излучения для морской воды с воздушными пузырьками, содержащими метан. При этом была выделена область длин волн от 0.2 до 2.5 мкм, где коэффициент поглощения метаном пренебрежимо мал, а поглощение водой слабо выражено. Для всех расчётов в данной работе использовались значения показателей преломления $n = n(\lambda)$ и поглощения $\chi = \chi(\lambda)$, представленные по данным для воды/льда [4].

На рис. 1 показаны значения функции пропускания $T(\lambda)$ при различных размерах частиц. Из рис. 1 видно, что затухания лучистой энергии практически не происходит при размерах частиц меньших или сравнимых с длиной волны падающего излучения. В случае крупных частиц (см. рис. 1, кривая 5), функция пропускания принимает значения, близкие к нулю в видимом спектре, и возрастает с увеличением длины волны падающего излучения.

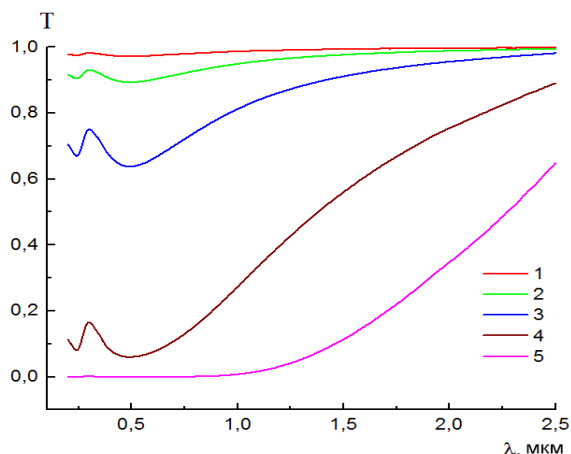


Рис. 1. Функция пропускания средой $T(\lambda)$ при разных значениях $\bar{a}$; $C = 1 \text{ л}^{-1}$, $h = 10 \text{ м}$. Кривая 1: $\bar{a} = 0.5 \text{ мкм}$; кривая 2: $\bar{a} = 1 \text{ мкм}$; кривая 3: $\bar{a} = 2 \text{ мкм}$; кривая 4: $\bar{a} = 5 \text{ мкм}$; кривая 5: $\bar{a} = 10 \text{ мкм}$.

На рис. 2 показаны значения коэффициента ослабления $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ при различных размерах частиц и концентрациях. Из рис. 2 видно, что ослабление падающего излучения возрастает при увеличении размеров частиц и их концентрации.

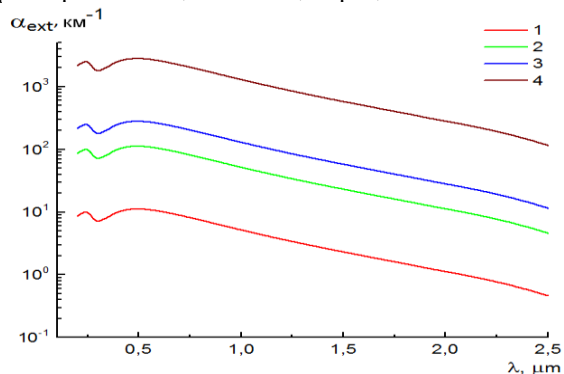


Рис. 2. Расчётные значения коэффициента ослабления $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$. Кривая 1: $\bar{a} = 1 \text{ мкм}$, $C = 1 \text{ л}^{-1}$; кривая 2: $\bar{a} = 5 \text{ мкм}$, $C = 1 \text{ л}^{-1}$; кривая 3: $\bar{a} = 1 \text{ мкм}$, $C = 10 \text{ л}^{-1}$; кривая 4: $\bar{a} = 5 \text{ мкм}$, $C = 10 \text{ л}^{-1}$.

На рис. 3 показаны значения функции пропускания $T(\lambda)$ при различных концентрациях частиц в единице объёма. Из рис. 3 видно, что для низкой концентрации (рис. 3, кривая 1) затухание лучистой энергии не столь велико, в то время как при высокой концентрации значение функции пропускания принимает ненулевые значения лишь на длинах волн выше 2.0 мкм .

Отметим, что для данного исследования величины факторов рассеяния и экстинкции приблизительно равны друг другу, а поглощение практически не влияет на полученные результаты. При проведении исследования на других спектральных диапазонах, факторы рассеяния и экстинкции могут отличаться, а также может наблюдаться ярко выраженный фактор поглощения.

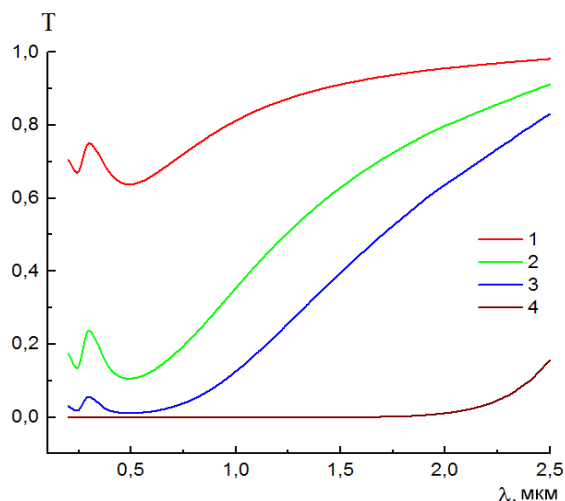


Рис. 3. Функция пропускания средой $T(\lambda)$ при разных значениях C , $\bar{a} = 2 \text{ мкм}$, $h = 10 \text{ м}$. Кривая 1: $C = 1 \text{ л}^{-1}$; кривая 2: $C = 5 \text{ л}^{-1}$; кривая 3: $C = 10 \text{ л}^{-1}$; кривая 4: $C = 100 \text{ л}^{-1}$.

Заключение

В данной работе были рассмотрены особенности ослабления лучистой энергии, проходящей через поверхностный слой воды с содержанием воздушных пузырьков. Были проанализированы результаты расчёта коэффициента ослабления оптического излучения и функции пропускания средой для морской воды с пузырьками, содержащими метан. Установлены ярко выраженные зависимости от размеров частиц и их концентрации, показаны характерные особенности ослабления падающего излучения в исследуемой модели среды. Результаты работы могут быть использованы в задачах дистанционного лазерного зондирования поверхностного слоя морской воды.

Работа выполнена в рамках Мега проекта ИК ТПУ 118.

Литература

1. П.А. Салюк, В.А. Буланов, И.В. Корсков. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах. // Подводные исследования и робототехника, 2011. – №2/12. – С. 43-50.
2. К. Борен, Д. Хафмен. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. // – М.: Мир, 1986. – 657 с.
3. О.А. Волковицкий, Л.Н. Павлова, А.Г. Петрушин. Оптические свойства кристаллических облаков. – Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
4. S.G. Warren, R.E. Brandt. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation. // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – D14220.