УДК 504.064, 681.785

С.М. КВАТЕРНЮК
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

Здійснено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах природних водних середовищ із завислими частинками фітопланктону на основі багатошарової структури, кожен з шарів якої має поглинаючі і розсіювальні властивості, зумовлені його біофізичними та структурними параметрами. Розраховано внесок кожного із шарів водного середовища у загальний коефіцієнт дифузного відбиття на поверхні середовища у видимому спектральному діапазоні.

Ключові слова: математична модель, неоднорідні природні середовища, спектральні характеристики, водний об'єкт, фітопланктон.

S. M. KVATERNIUK
Vinnytsia National Technical University

MATHEMATICAL MODELING OF NATURAL AQUATIC ENVIRONMENT FOR THE OBJECTIVES OF ENVIRONMENTAL CONTROL

Multispectral method can be used for applied tasks of ecological control of parameters of aqueous media, which are reduced to measuring their parameters in the near-surface layer. Mathematical modelling of multilayered natural water environments is an actual problem for applied problems of indirect measurement of their parameters and environmental control. The aim of the work is mathematical modelling of multi-layered natural aqueous media with suspended particles of phytoplankton, which is necessary to determine the contribution of each layer to the overall coefficient of diffuse reflection on the surface of the medium in a given spectral range. Mathematical modelling of radiation transfer in the near-surface layers of natural aqueous media with suspended phytoplankton particles on the basis of a multilayer structure, each of whose layers has absorbing and scattering properties due to its biophysical and structural parameters, is carried out. The obtained results of solving a direct optical problem allow us to relate the parameters of natural water media with their spectral characteristics. In turn, this allows us to solve the inverse problem of determining the parameters of aqueous media based on the results of multispectral measurements, that is, indirectly measure the parameters of water objects by the multispectral method, which are of interest for the tasks of ecological control of their state, namely the concentration of phytoplankton particles, the concentration or the ratio of pigments in the near-surface layer water and the like. The calculated spectral characteristics of each layer of the aqueous medium are consistent with the results of the experimental measurements. It was established, what effect is the change in the phytoplankton concentration in the aqueous medium on its spectral characteristics, and also on the overall coefficient of diffuse reflection on the surface.

Keywords: mathematical model, heterogeneous natural environments, spectral characteristics, water object, phytoplankton.

Вступ

Мультиспектральний метод може використовуватись для прикладних задач екологічного контролю параметрів водних середовищ, що зводяться до вимірювання їх параметрів у приповерхневому шарі. За умови відомих параметрів неоднорідних природних середовищ необхідно спочатку розв'язати пряму задачу розрахунку спектральних характеристик водних середовищ [1–3]. Розв'язання зворотної оптичної задачі, наприклад, з використанням регресійних рівнянь, дає можливість визначити параметри середовища за результати мультиспектральних вимірювань [4]. Математичне моделювання багатошарових природних водних середовищ є актуальною проблемою для прикладних задач опосередкованого вимірювання їх параметрів та екологічного контролю. Метою роботи є математичне моделювання багатошарових природних водних середовищ з завислими частинками фітопланктону, що необхідно для визначення внеску кожного із шарів у загальний коефіцієнт дифузного відбиття на поверхні середовища у заданому спектральному діапазоні. Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі: здійснити математичне моделювання спектральних характеристик одного шару водного середовища із завислими частинками фітопланктону; здійснити математичне моделювання переносу випромінювання у багатошаровій структурі природного водного середовища; оцінити внесок кожного із шарів водного середовища у загальний коефіцієнт дифузного відбиття на поверхні середовища у видимому спектральному діапазоні.

Математичне моделювання спектральних характеристик окремого шару водного середовища із завислими частинками фітопланктону

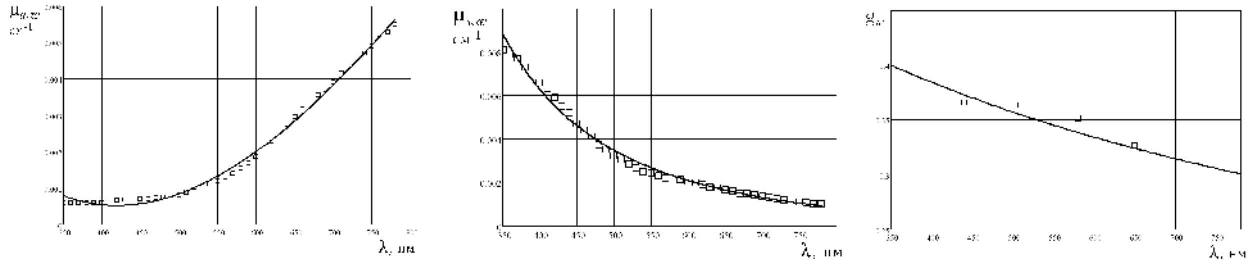
Спектральні характеристики показників поглинання $\mu_{a,w}(\lambda)$, розсіювання $\mu_{s,w}(\lambda)$ та фактору анізотропії для природного водного середовища апроксимуємо на основі результатів експериментальних досліджень (див. рис. 1):

$$\mu_{s,w}(\lambda) = 8,209\times10^{3}\,\lambda^{-2,33} - 0,016\lambda^{-0.494}\,, \quad (1)$$

$$\mu_{a,w}(\lambda) = 0,012 - 6,149\times10^{-5}\,\lambda + 9,482\times10^{-8}\,\lambda^{2} - 3,429\times10^{-11}\,\lambda^{3}\,, \quad (2)$$

$$g_{w}(\lambda) = 0,554 - 5,753\times10^{-4}\,\lambda + 4,383\times10^{-7}\,\lambda^{2} - 1,508\times10^{-10}\,\lambda^{3}\,. \quad (3)$$

Спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону вводимо в математичну модель використовуючи лінійну інтерполяцію на основі таблиці експериментальних даних вимірювань [6]. Графіки спектральних характеристик показників поглинання основних пігментів фітопланктону наведено на рис. 2.



а) б) в)

Рис. 1. Спектральні характеристики показників поглинання (а), розсіювання (б) та фактору анізотропії (в) природного водного середовища

В свою чергу показники поглинання та розсіювання фітопланктону залежать від його біофізичних та структурних параметрів. Використовуємо формулу показника розсіювання для оптично м'яких частинок [5]:

$$\mu_{s,ph}(\lambda) = 440,72P(1-P)(1,4-P)\left(\frac{685}{\lambda}\right), \quad (4)$$

де P – об'ємний вміст пігментів фітопланктону, λ – довжина хвилі в нм.

Показник поглинання фітопланктону визначається як:

$$\mu_{a,ph}(\lambda) = C_{Chla}\mu_a^{Chla} + C_{Chlb}\mu_a^{Chlb} + C_{carot}\mu_a^{carot}, \quad (5)$$

де C_{Chla}, C_{Chlb}, C_{carot} – молярна концентрація основних пігментів у біомасі фітопланктону; μ_a^{Chla}, μ_a^{Chlb}, μ_a^{carot} – молярні показники поглинання основних пігментів фітопланктону.

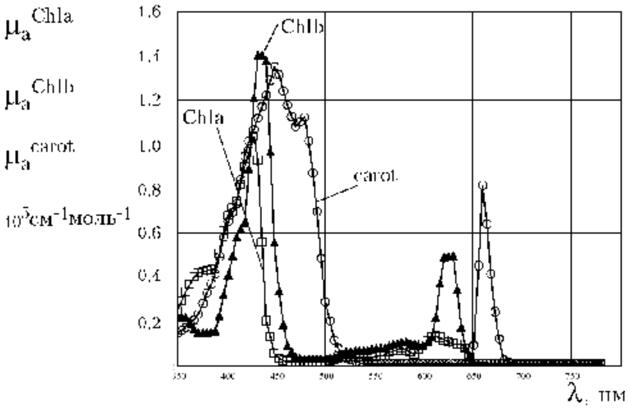
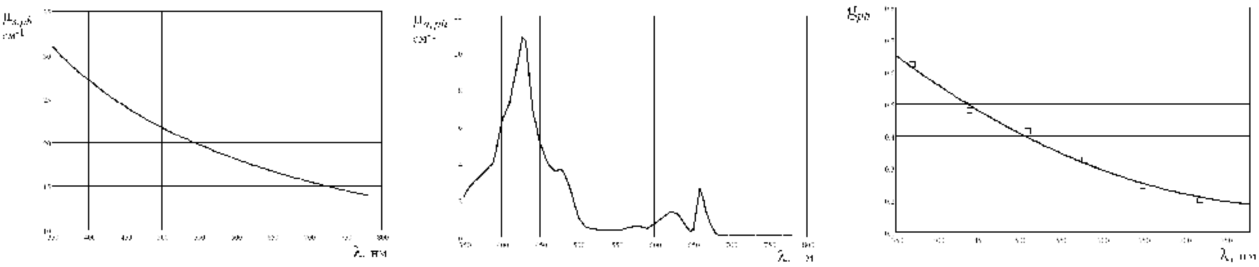


Рис. 2. Спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону

Спектральна характеристика фактору анізотропії частинок фітопланктону визначається розмірами і формою його частинок. У математичній моделі приймаємо середній діаметр частинок фітопланктону 10 мкм та їх сферичну форму. Тоді апроксимована спектральна характеристика фактору анізотропії фітопланктону буде мати такий вигляд:

$$g_{ph}(\lambda) = 1,554 - 3,213\times10^{-3}\lambda + 1,863\times10^{-6}\lambda^2 + 3,325\times10^{-11}\lambda^3. \quad (6)$$

Графіки спектральних характеристик показників поглинання, розсіювання та фактору анізотропії фітопланктону обчислені за формулами (4)–(6) наведено на рис. 3.



а) б) в)

Рис. 3. Спектральні характеристики показників поглинання (а), розсіювання (б) та фактору анізотропії (в) фітопланктону

Виходячи з одношарової моделі, проведемо математичне моделювання природного водного середовища з завислими частинками фітопланктону, що має такі параметри: біомаса фітопланктону від 17,7 до 35,4 мг/л; співвідношення між хлорофілом а та хлорофілом *b* у фітопланктоні 0,8; співвідношення між каротиноїдами та сумарним вмістом хлорофілів 0,27; вміст хлорофілу а у сирій масі фітопланктону 0,5%. Приймемо товщину кожного з шарів водного середовища 10 см та однакову концентрацію завислих частинок фітопланктону у всіх шарах. Розраховуємо спектральні характеристики показника розсіювання (1), ефективних показників розсіювання (2) та ослаблення (3), ймовірності виживання фотону(4), коефіцієнту направленого пропускання (5) та коефіцієнту дифузного відбиття (6) шару природного водного середовища за методикою наведеною у [1–3]. На рис. 4 представлено графіки розрахованих спектральних характеристик для шару природного водного середовища.

Математичне моделювання переносу випромінювання у багатошаровій структурі природного водного середовища

Спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища відповідають складовим від його окремих шарів:

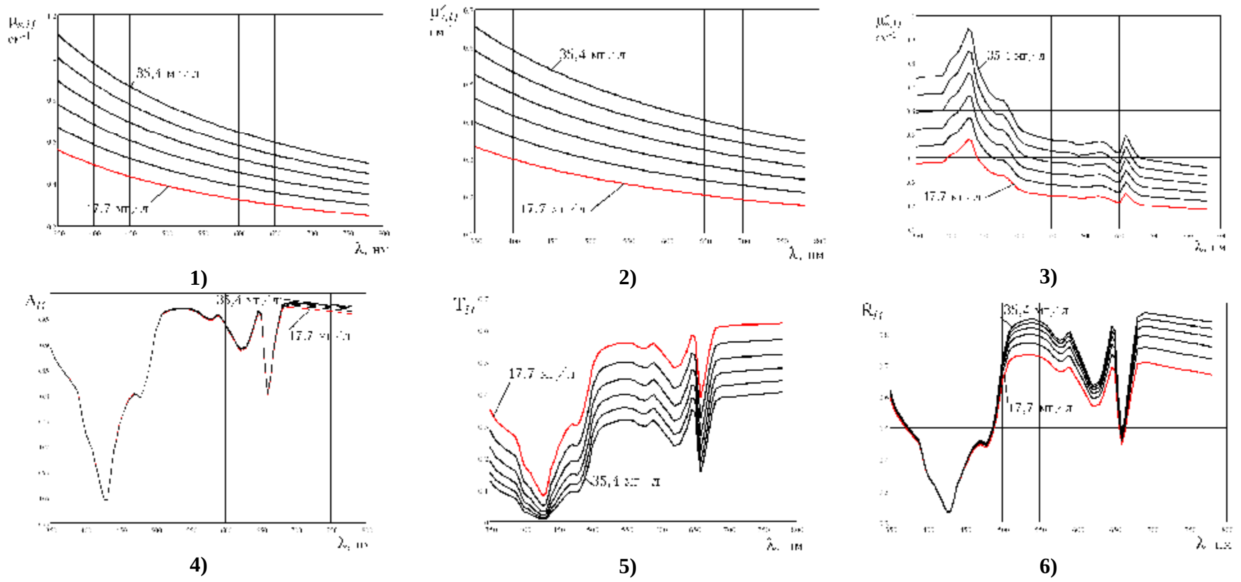


Рис. 4. Спектральні характеристики шару природного водного середовища

$$R_d = \sum_{i=1}^{n} R'_{di} \tag{7}$$

де R_{di} − складова коефіцієнту дифузного відбивання, що створюються від i-го шару, причому

$$R'_{di} = (1 - R_{01})^2 \prod_{j=1}^{i} T^2_{l(j-1)} T_{lj} R_{lj}, \tag{8}$$

де R_{01} − складова коефіцієнту відбиття на межі повітря-водне середовище; T_l – коефіцієнт направленого пропускання шару природного водного середовища, R_l – коефіцієнт дифузного відбиття шару природного водного середовища.

Частка коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища, що вноситься i-м шаром $R_{di} = R'_{di} \times 100\% / R_d$. На основі спектральних характеристик для кожного з шарів природного водного середовища розраховуємо частки коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища, що вноситься його i-м шаром та загальний коефіцієнт дифузного відбиття (див. рис. 5).

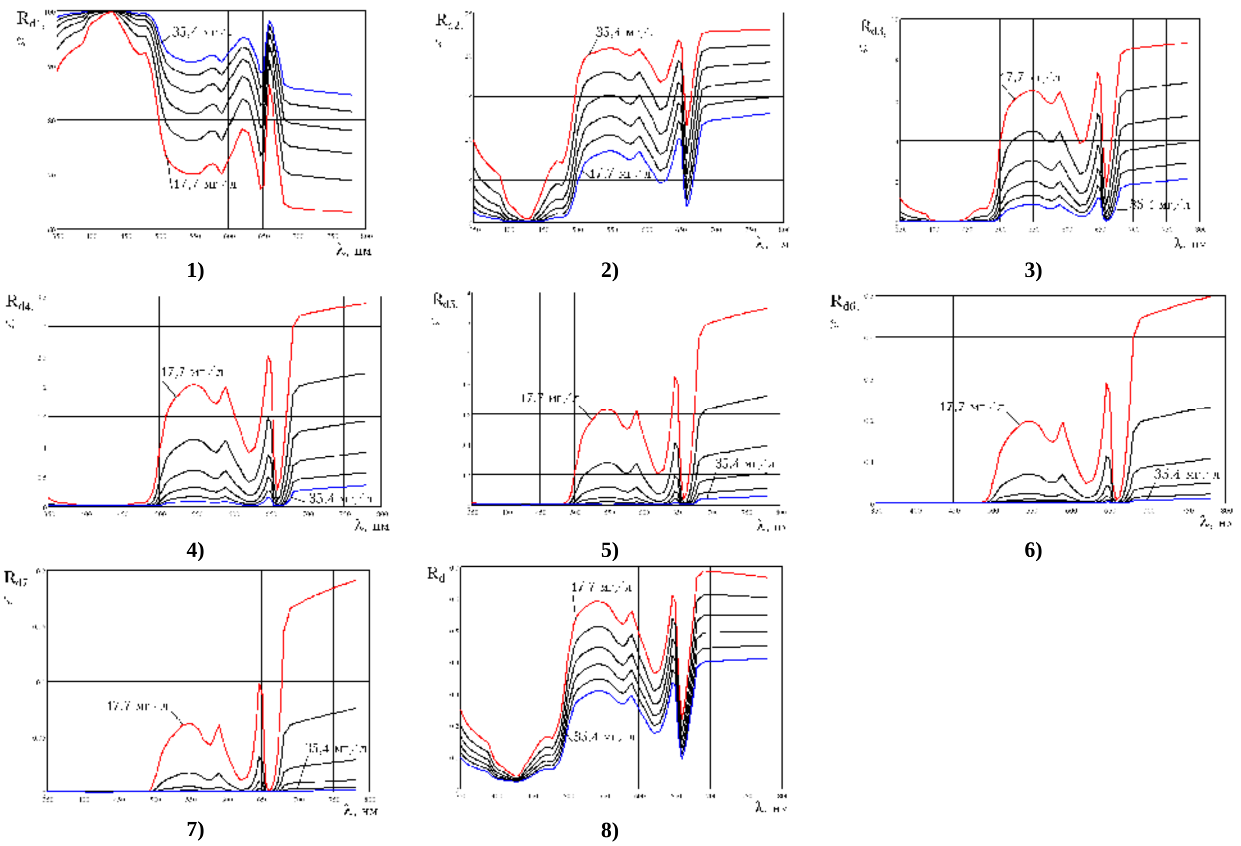


Рис. 5. Спектральні характеристики складових коефіцієнту дифузного відбиття шарів природного водного середовища та загального коефіцієнту дифузного відбиття на його поверхні

Оскільки, при заданих параметрах природного водного середовища із завислими частинками фітопланктону, сьомий шар водного середовища вносить частку у коефіцієнт дифузного відбиття меншу 0,2%, яка суттєво менша порівняно з похибкою мультиспектральних вимірювань, то внеском сьомого шару і шарів, які знаходяться нижче, можна знехтувати. При цьому їх біофізичні та структурні параметри не можливо виміряти з поверхні середовища мультиспектральним методом.

Висновки

Здійснено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах природних водних середовищ із завислими частинками фітопланктону на основі багатошарової структури, кожен з шарів якої має поглинаючі і розсіювальні властивості, зумовлені його біофізичними та структурними параметрами. Отримані результати розв’язання прямої оптичної задачі дозволяють пов’язати параметри природних водних середовищ з їх спектральними характеристиками. В свою чергу, це дозволяє розв’язати зворотну задачу визначення параметрів водних середовищ з результатів мультиспектральних вимірювань, тобто опосередковано вимірювати мультиспектральним методом параметри водних об’єктів, які цікаві для задач екологічного контролю їх стану, а саме концентрацію частинок фітопланктону, концентрацію чи співвідношення пігментів у приповерхневому шарі води тощо. Розраховані спектральні характеристики кожного шару водного середовища узгоджуються з результатами експериментальних вимірювань. При цьому встановлено, який вплив має зміна концентрації фітопланктону у водному середовищі на його спектральні характеристики, а також на загальний коефіцієнт дифузного відбиття на поверхні.

Література

Кватернюк С.М. Математичне моделювання переносу випромінювання у багатошарових неоднорідних біологічних середовищах для задач мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики / С.М. Кватернюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – № 2(32). – С. 57–63.

Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об’єкту біомедичної діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчик, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 218–222.

Петрук В. Г. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56.

Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22.

Пушкарева А. Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. Учебное пособие / А. Е. Пушкарева. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.

Retrieval of Foliar Information about Plant Pigment Systems from High Resolution Spectroscopy / S. Ustin, A. Gitelson, S. Jacquemoud et al. // Remote Sensing of Environment. – 2009. – V.113. – Suppl.1 – P. 67–77.

References

Kvaternyuk S. M. Matematychne modeliuvannia perenosu vyprominiuvannia u bahatosharovykh neodnoridnykh biolohichnykh seredovyshchakh dlia zadach multyspektralnoho vymiriuvalnoho kontroliu ta diahnostyky / S. M. Kvaternyuk // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2016. – №2(32). – P. 57–63.

Modelyuvannya spektralnyh harakterystyk sharu epidermisu biotkanyny shkiry yak obyektu biome-dychnoyi diagnostyky / V. G. Petruk, O. Ye. Kvaternyuk, Yu. S. Lyubchy‘k, S. M. Kvaternyuk // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2015. – № 2. – P. 218–222.

Kvaternyuk S. M. Matematychne modeliuvannia vplyvu parametriv okremykh shariv na spektralni kharakterystyky neodnoridnykh biotkanyn / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. Ye. Kvaternyuk et al. // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2015. – №3. – P. 50–56.

Kvaternyuk S. M. Metod ta zasoby multyspektralnogo televizijnogo vymiryuvalnogo kontrolyu stanu neodnoridnyh biologichnyh seredovyshh / S. M. Kvaternyuk // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2017. – №1. – P. 15–22.

Pushkareva A. E. Metody matematycheskoho modelyrovanyia v optyke byotkany. Uchebnoe posobye / A. E. Pushkareva. – SPb: SPbHU YTMO, 2008. – 103 p.

Retrieval of Foliar Information about Plant Pigment Systems from High Resolution Spectroscopy / S. Ustin, A. Gitelson, S. Jacquemoud et al. // Remote Sensing of Environment. – 2009. – V.113. – Suppl.1 – P.67–77.

Отримана/Received : 15.2.2018 р. Надрукована/Printed :26.3.2018 р.
Стаття рецензована редакційною колегією