

УДК 504.064, 681.785

С. М. КВАТЕРНЮК

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

*Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21010, Україна,
тел.: +380 (432) 59-84-43, E-mail: serg.kvaternuk@gmail.com*

Анотація. Досліджено вплив співвідношень між основними пігментами, а саме хлорофілом а, хлорофілом б та каротиноїдами на спектральні характеристики водних середовищ з частинками фітопланктону. Розраховано спектральні характеристики показника розсіювання, фактору анізотропії, ефективних показників розсіювання та ослаблення, частки світла, розсіяного в передню півсферу, ймовірності виживання фотону, показника послаблення в малокутовому наближенні, коефіцієнту направленої пропускання та коефіцієнту дифузного відбиття для одного шару водного середовища з заданими структурними та пігментними параметрами фітопланктону, а також спектральну характеристику загального коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища.

Аннотация. Исследовано влияние соотношений между основными пигментами, а именно хлорофиллом а, хлорофиллом б и каротиноидами на спектральные характеристики водных сред с частицами фитопланктона. Рассчитаны спектральные характеристики показателя рассеяния, фактора анизотропии, эффективных показателей рассеяния и ослабления, части светового излучения рассеянного в переднюю полусферу, вероятности выживания фотона, показателя ослабления в малоугловом приближении, коэффициента направленного пропускания и коэффициента диффузного отражения для одного слоя водной среды с заданными структурными и пигментными параметрами фитопланктона, а также спектральную характеристику общего коэффициента диффузного отражения на поверхности водной среды.

Abstract. The influence of the relationships between the main pigments, namely chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids on the spectral characteristics of aqueous media with phytoplankton particles, was studied. The spectral characteristics of the scattering index, the anisotropy factor, the effective scattering and attenuation parameters, the part of the light scattered into the forward hemisphere, the probability of photon survival, the attenuation index in the small-angle approximation, the transmission coefficient and the diffuse reflection coefficient for one layer of an aqueous medium with specified structural and pigment parameters of phytoplankton, as well as spectral characteristics of the total coefficient of diffuse reflection on the surface one medium.

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

ВСТУП

Для прикладних задач екологічного моніторингу водних об'єктів, їх екотоксикологічного контролю, а також багатопараметричного контролю якості води використовують метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю [1-10]. Цей метод полягає у аналізі цифрових зображень водних об'єктів, отриманих у декількох спектральних діапазонах.

Мультиспектральний метод може реалізуватись у різних варіантах. Наприклад у роботі [7] мультиспектральний метод використано для дослідження зображень біотканин у відбитому випромінюванні та флюоресценції. Аналізувати просторовий розподіл концентрації фітопланктону у водних об'єктах з високою роздільною здатністю можливо за допомогою дистанційних мультиспектральних засобів супутникового моніторингу [8]. Є можливості реалізувати мультиспектральний метод на основі багатохвильового лідар [9]. Сучасні алгоритми обробки мультиспектральних зображень дозволяють підвищити роздільну здатність та з більшою точністю визначати просторовий розподіл пігментів у водних об'єктах [10].

Для опосередкованого вимірювання структурних (концентрація частинок, середні розміри частинок, біомаса у заданому об'ємі) та пігментних (концентрації основних пігментів, співвідношення між пігментами) параметрів фітопланктону, а також для аналізу їх зміни у водному об'єкті у різних його частинах з глибиною необхідно спочатку розв'язати пряму оптичну задачу, що дозволяє отримати спектральні характеристики об'єкту дослідження при відомих його параметрах. Далі розв'язок зворотної задачі дозволяє отримати на основі мультиспектральних вимірювань структурні та пігментні параметри водного середовища з частинками фітопланктону.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є дослідження впливу співвідношень між основними пігментами, а саме хлорофілом *a*, хлорофілом *b* та каротиноїдами на спектральні характеристики природних водних середовищ для задач екологічного контролю.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі:

– здійснити математичне моделювання спектральних характеристик показника розсіювання, фактору анізотропії, ефективних показників розсіювання та ослаблення, частки світла, розсіяного в передню півсферу, ймовірності виживання фотону, показника послаблення в малокутовому наближенні, коефіцієнту направлено пропускання та коефіцієнту дифузного відбиття для одного шару водного середовища з частинками фітопланктону при зміні співвідношень між основними пігментами фітопланктону;

– розрахувати спектральну характеристику загального коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні співвідношень між основними пігментами.

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗНИКІВ ПОГЛИНАННЯ ФІТОПЛАНКТОНУ ПРИ ЗМІНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ОСНОВНИХ ПІГМЕНТІВ

Використовуючи методику математичного моделювання розсіювання світла у малокутовому наближенні (МКН) у багат шарових неоднорідних біологічних середовищах розв'яжемо пряму задачу визначення спектральних характеристик природних водних середовищ з відомими параметрами фітопланктону для двох випадків зміни співвідношень між основними пігментами фітопланктону, а саме:

а) співвідношення між хлорофілом *a* та хлорофілом *b* змінюється від 0,8 до 0,9; співвідношення між каротиноїдами та сумарним вмістом хлорофілів 0,27;

б) співвідношення між хлорофілом *a* та хлорофілом *b* у фітопланктоні 0,8; співвідношення між каротиноїдами та сумарним вмістом хлорофілів змінюється від 0,2 до 0,4.

У кожному з прикладів біомаса фітопланктону 17,7 мг/л, вміст хлорофілу *a* у сирій масі фітопланктону прийнято 0,5%, використовується 7 шарів водного середовища глибиною по 10 см, концентрація частинок фітопланктону у кожному шарі прийнята однаковою. Спектральні характеристики показника поглинання, показника розсіювання та фактору анізотропії для водного середовища без фітопланктону, але з наявністю завислих частинок органічного походження апроксимовано на основі результатів експериментальних досліджень. Молярні спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону наведено на рис. 1 [11].

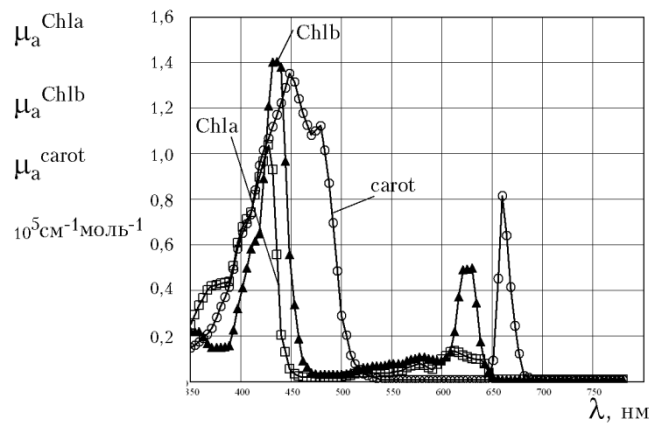


Рис. 1. Молярні спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону

Розраховуємо показник поглинання фітопланктону, що визначається концентраціями пігментів та їх молярними показниками поглинання:

$$\mu_{a,ph}(\lambda) = C_{Chla} \mu_a^{Chla} + C_{Chlb} \mu_a^{Chlb} + C_{carot} \mu_a^{carot}, \quad (1)$$

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.

Розраховані спектральні характеристики показників поглинання фітопланктону при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом наведені на рис. 2,а; при зміні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом на рис. 2,б.

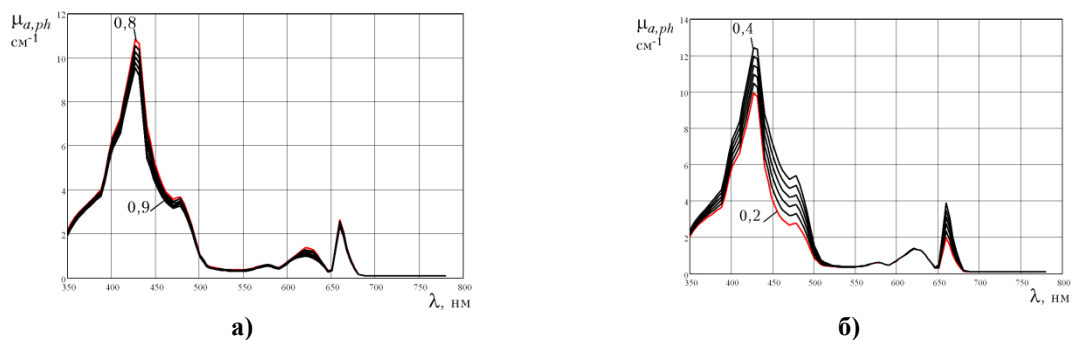


Рис. 2. Спектральні характеристики показників поглинання фітопланктону: при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом (а); при зміні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом (б)

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ІЗ ЧАСТИНКАМИ ФІТОПЛАНКТОНУ ПРИ ЗМІНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ПІГМЕНТІВ

Ефективний показник поглинання шару природного водного середовища з об'ємною концентрацією частинок фітопланктону f_{ph} [12]:

$$\mu'_{a,l}(\lambda) = \mu_{a,ph}(\lambda) f_{ph} + \mu_{a,w}(\lambda) (1 - f_{ph}). \quad (2)$$

Показник розсіювання шару природного водного середовища [12]:

$$\mu'_{s,l}(\lambda) = \mu_{s,ph}(\lambda) f_{ph} + \mu_{s,w}(\lambda) (1 - f_{ph}). \quad (3)$$

Фактор анізотропії шару водного середовища [12]:

$$g_{II}(\lambda) = g_{a,ph}(\lambda) f_{ph} + g_{a,w}(\lambda)(1 - f_{ph}). \quad (4)$$

Ефективний показник розсіювання шару природного водного середовища [12]:

$$\mu'_{s,II} = \mu_{s,II}(1 - g_{II}(\lambda)). \quad (5)$$

Ефективний показник ослаблення шару природного водного середовища [12]:

$$\mu'_{e,II} = \mu'_{a,II} + \mu'_{s,II}. \quad (6)$$

Частка світла, розсіяного в передню півсферу для індикатрис з великим ступенем витягнутості «вперед» [13]:

$$F_{II}(\lambda) = 0.5 \int_0^{\pi/2} p(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta \approx 1 - [1 - g_{II}(\lambda)]/3. \quad (7)$$

Ймовірність виживання фотона [13]

$$\Lambda_{II}(\lambda) = \frac{\mu'_{s,II}(\lambda)}{\mu'_{e,II}(\lambda)}. \quad (8)$$

Показник послаблення в малокутовому наближенні [13]:

$$\alpha_{II}(\lambda) = \mu'_{e,II}(\lambda)(1 - \Lambda_{II}(\lambda)F_{II}(\lambda)). \quad (9)$$

Коефіцієнт направленої пропускання шару природного водного середовища [14]:

$$T_{II}(\lambda) = \exp[-\alpha_{II}(\lambda)d_{II}]. \quad (10)$$

Коефіцієнт дифузного відбиття шару природного водного середовища [12]:

$$R_{II}(\lambda) = \Lambda_{II}(\lambda) \frac{1 - F_{II}(\lambda)}{1 - F_{II}(\lambda)\Lambda_{II}(\lambda)} \int_0^1 \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)d_{II} \frac{1+v}{v}]\} dv, \quad (11)$$

де $v = \cos(\gamma)$, γ – кут розсіювання.

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

$$R_d = \sum_{i=1}^n R'_{di} = \sum_{i=1}^n (1 - R_{01})^2 \prod_{j=1}^i T_{i(j-1)}^2 T_{ij} R_{ij}, \quad (12)$$

де R_{di} – складова коефіцієнту дифузного відбиття, що створюються від i -того шару, R_{01} – складова коефіцієнту відбиття на межі повітря-водне середовище; T_{ij} – коефіцієнт направленої пропускання шару природного водного середовища, R_{ij} – коефіцієнт дифузного відбиття шару природного водного середовища.

Розраховуємо спектральні характеристики показника поглинання (1), показника розсіювання (2), фактору анізотропії (3), ефективних показників розсіювання (4) та ослаблення (5), частки світла, розсіяного в передню півсферу (6), ймовірності виживання фотону(7), показника послаблення в малокутовому наближенні (8), коефіцієнту направленої пропускання (9), коефіцієнту дифузного відбиття (10) шару природного водного середовища та коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища (11). На рис. 3 представлено графіки розрахованих спектральних характеристик для природного водного середовища з частинками фітопланктону при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом.

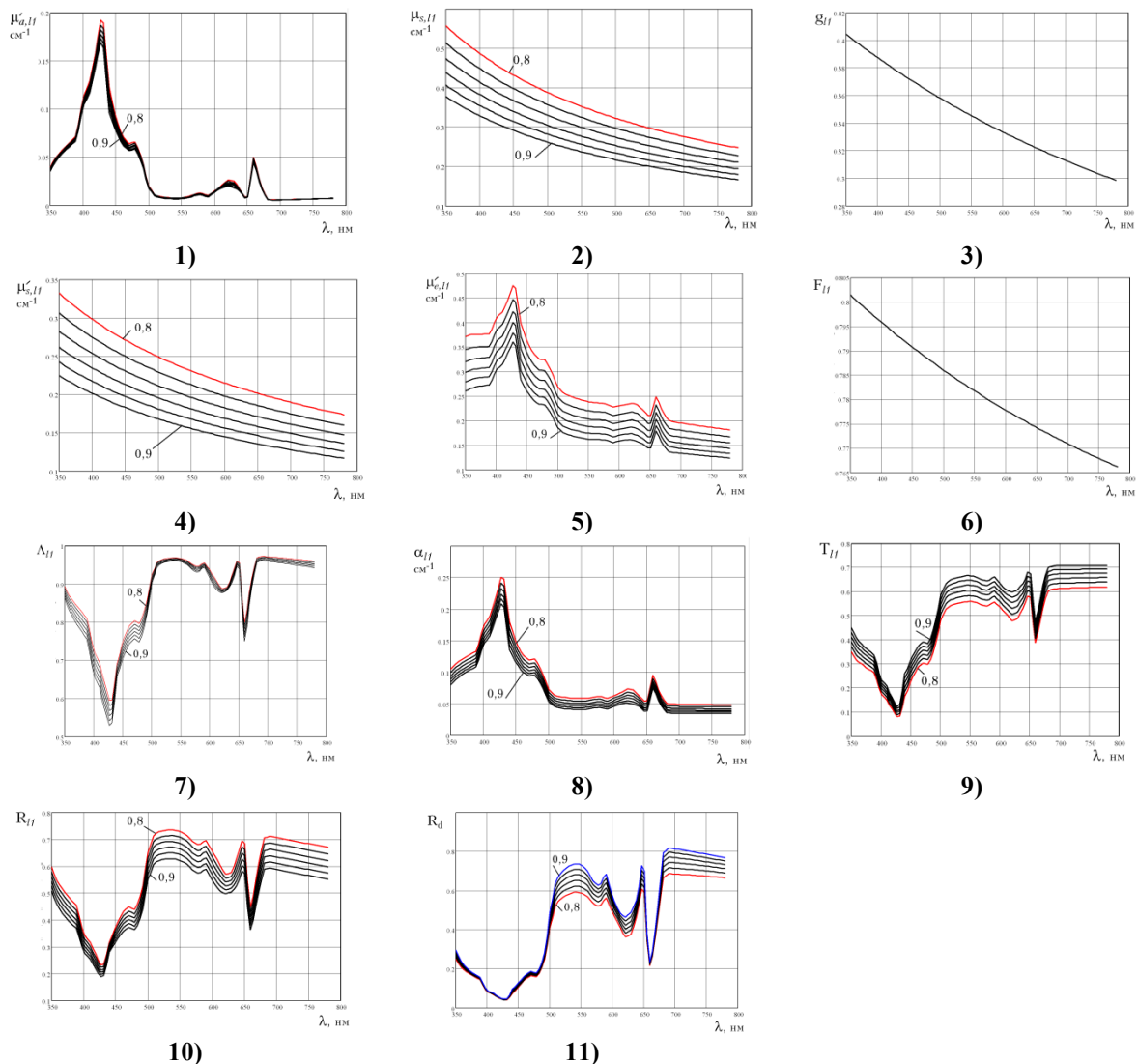


Рис. 3. Спектральні характеристики шару природного водного середовища при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом

У видимому оптичному діапазоні найбільш зміни у коефіцієнті дифузного відбиття на поверхні водного середовища (рис. 3.11) при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом є на довжинах хвиль від 500 до 650 нм та від 680 до 780 нм. Для коефіцієнту направленного пропускання (рис. 3.9) та коефіцієнту дифузного відбиття (рис. 3.10) для окремо взятого шару природного водного середовища з частинками фітопланктону зміни помітні у всьому спектральному діапазоні. Вказані особливості спектральних характеристик впливають на роботу засобів екологічного контролю водних середовищ при їх роботі над поверхнею водного об'єкта, наприклад, з використанням квадрокоптерів, які вимірюють коефіцієнт відбиття на поверхні. Таким чином з'являється можливість вимірювання структурних і пігментних параметрів фітопланктону у водних об'єктах з великою площею для задач екологічного моніторингу їх стану. При роботі засобів екологічного контролю, які занурюються на певну глибину у водний об'єкт вимірюються коефіцієнти направленного пропускання чи коефіцієнт відбиття для певного шару водного середовища, що дозволяє проаналізувати зміни структурних чи пігментних параметрів фітопланктону з глибиною.

На рис. 4 представлено графіки розрахованих спектральних характеристик для природного водного середовища з частинками фітопланктону при зміні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом.

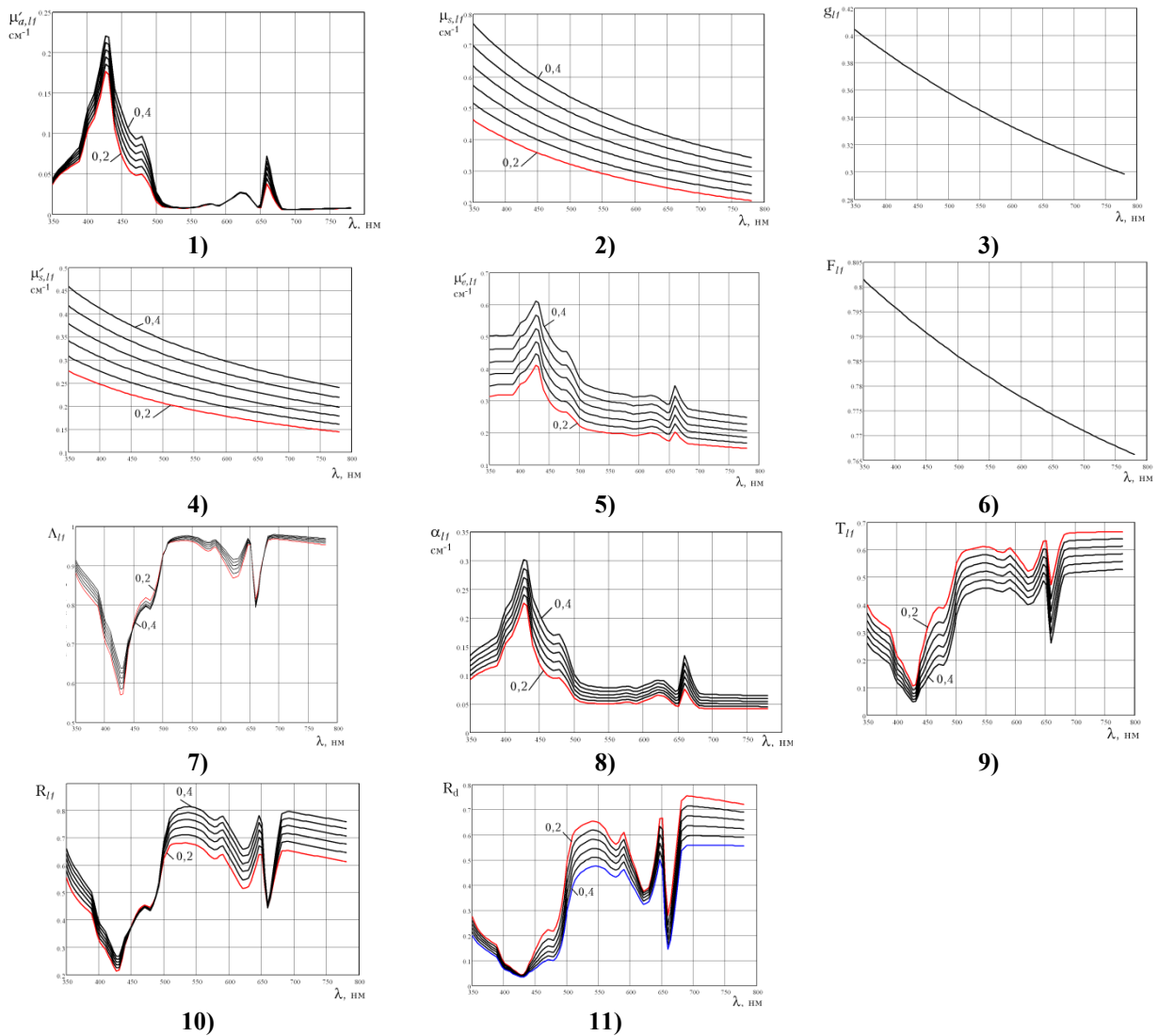


Рис. 4. Спектральні характеристики шару природного водного середовища при зміні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом

Порівнюючи спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом (рис. 3.11) та при зміні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом (рис. 4.11) можна помітити суттєві відмінності у діапазоні від 430 до 500 нм. У вказаному діапазоні можливо досліджувати співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом, при цьому зміна співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом майже не впливатиме на коефіцієнт дифузного відбиття. Також помітні відмінності у діапазоні від 650 до 680 нм, що може бути використана для вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом.

ВИСНОВКИ

Здійснено математичне моделювання переносу випромінювання у природних водних середовищах із частинками фітопланктону, що дозволило проаналізувати вплив співвідношень між основними пігментами, а саме хлорофілом а, хлорофілом b та каротиноїдами на їх спектральні характеристики. Розраховано та проаналізовано спектральні характеристики показника розсіювання, фактору анізотропії, ефективних показників розсіювання та ослаблення, частки світла, розсіяного в передню півсферу, ймовірності виживання фотону, показника послаблення в малокутовому наближенні, коефіцієнту направленного пропускання та коефіцієнту дифузного відбиття для одного шару водного середовища з заданими структурними та пігментними параметрами фітопланктону. На основі порівняння спектральних характеристик загального коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища

визначено спектральні діапазони від 500 до 650 нм та від 680 до 780 нм для дослідження співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом, а також діапазон від 430 до 500 нм та від 650 до 680 нм для дослідження співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом. Вибір вказаних спектральних діапазонів дозволяє незалежно визначати співвідношення між основними пігментами фітопланктону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The method of multispectral image processing of phytoplankton processing for environmental control of water pollution / V. Petruk, S. Kvaternyuk, V. Yasynska [et al.] // Proc. SPIE, 2015. Vol. 9816, 98161N (17 December 2015). – P. 98161N-1–98161N-5; doi: 10.1117/12.2229202.
2. Multispectral televisional measuring control of the ecological state of waterbodies on the characteristics macrophytes / V. Petruk, S. Kvaternyuk, A. Kozachuk [et al.] // Proc. SPIE, 2015. Vol. 9816, 98161Q (17 December 2015). – P. 98161Q-1–98161Q-4; doi: 10.1117/12.2229343.
3. Multispectral television monitoring of contamination of water objects by using macrophyte-based bioindication / R. V. Petruk, V. D. Pohrebennyk, S. M. Kvaternyuk [et al.] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, Book 5, Vol. 2. – P. 597-602.
4. Martsenyuk V. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton / V. Martsenyuk, V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk [et al.] // 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016), Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea. – P. 988-993. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832429.
5. Petruk V. Experimental studies of phytoplankton concentrations in water bodies by using of multispectral images / Petruk V., Kvaternyuk S., Pohrebennyk V. [et al.] // Water Supply and Wastewater Removal. Editors: Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. – Lublin : Lublin University of Technology, 2016. – 229 p.
6. Гиперспектральная диагностика современной техносферы / В. К. Шухостанов, Л. А. Ведешин, А. Г. Цыбанов // Пятая юбилейная открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» : Сборник тезисов конференции, 12-16 ноября 2007 г. – Москва: ИКИ РАН, 2007. – С. 243-248.
7. Symvoulidis P. Serial sectioning and multispectral imaging system for versatile biomedical applications / P. Symvoulidis, C. Cruz Perez, M. Schwaiger [et al.] // IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, ISBI, 29 April – 2 May 2014, Beijing, China. – P.890-893.
8. Application of hyperspectral remote sensing to cyanobacterial blooms in inland waters / R. M. Kudela, S. L. Palacios, D. C. Austerberry [et al.] // Remote Sensing of Environment – 2015. – № 2. – P. 1-10.
9. Improving Backscatter Intensity Calibration for Multispectral LiDAR /S. Shi, S. Song, W. Gong [et al.] // Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2015. – Vol. 12. – № 7. – P. 1421-1425.
10. Multispectral image enhancement based on fusion and super-resolution / V. Starovoitov, A. Makarau, I. Zakharov [et al.] // 15th European Signal Processing Conference, Poznan, Poland, September 3-7, 2007. – P. 2174-2178.
11. Ustin S. 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. – P. 67-77.
12. Барун В. В. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в каждом покрове / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, И. В. Васильковский// Проблемы оптической физики и биофотоники. Материалы 12-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2009. – С. 69-78.
13. Зеге Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде / Э. П. Зеге, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск: Наука и техника, 1975. – 327 с.
14. Пушкарева А. Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. Учебное пособие / А. Е. Пушкарева. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.

REFERENCES

1. The method of multispectral image processing of phytoplankton processing for environmental control of water pollution / V. Petruk, S. Kvaternyuk, V. Yasynska [et al.] // Proc. SPIE, 2015. Vol. 9816, 98161N (17 December 2015). – P. 98161N-1–98161N-5; doi: 10.1117/12.2229202.
2. Multispectral televisional measuring control of the ecological state of waterbodies on the

- characteristics macrophytes / V. Petruk, S. Kvaternyuk, A. Kozachuk [et al.] // Proc. SPIE, 2015. Vol. 9816, 98161Q (17 December 2015). – P. 98161Q-1–98161Q-4; doi: 10.1117/12.2229343.
3. Multispectral television monitoring of contamination of water objects by using macrophyte-based bioindication / R. V. Petruk, V. D. Pohrebennyk, S. M. Kvaternyuk [et al.] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, Book 5, Vol. 2. – P. 597-602.
 4. Martsenyuk V. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton / V. Martsenyuk, V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk [et al.] // 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016), Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea. – P. 988-993. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832429.
 5. Petruk V. Experimental studies of phytoplankton concentrations in water bodies by using of multispectral images / Petruk V., Kvaternyuk S., Pohrebennyk V. [et al.] // Water Supply and Wastewater Removal. Editors: Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. – Lublin : Lublin University of Technology, 2016. – 229 p.
 6. Giperspektralnaia diagnostika sovremennoi tekhnosfery / V. K. Shukhostanov, L. A. Vedeshin, A. G. Tsybanov // Piataia iubileinaia otkrytaia Vserossiiskaia konferentsiia «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa» : Sbornik tezisov konferentsii, 12-16 noiabria 2007. – Moskva: IKI RAN, 2007. – S. 243-248.
 7. Serial sectioning and multispectral imaging system for versatile biomedical applications / Symvoulidis P., Cruz Perez C., Schwaiger M. [et al.] // IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, ISBI, 29 April – 2 May 2014, Beijing, China. – P. 890-893.
 8. Application of hyperspectral remote sensing to cyanobacterial blooms in inland waters / R. M. Kudela, S. L. Palacios, D. C. Austerberry [et al.] // Remote Sensing of Environment – 2015. – № 2. – P. 1–10.
 9. Improving Backscatter Intensity Calibration for Multispectral LiDAR /S. Shi, S. Song, W.Gong [et al.] // Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2015. – Vol.12. – № 7. – P. 1421-1425.
 10. Multispectral image enhancement based on fusion and super-resolution / V. Starovoitov, A. Makarau, I. Zakharov [et al.] // 15th European Signal Processing Conference, Poznan, Poland, September 3-7, 2007. – P. 2174-2178.
 11. Ustin S. 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. – P. 67-77.
 12. Barun V. V. Modelirovanie vlijanija jepidermisa na perenos sveta i tepla v kozhnom pokrove / V. V. Barun, A. P. Ivanov, V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, I. V. Vasil'kovskij // Problemy opticheskoi fiziki i biofotoniki. Materialy 12-oi Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj shkoly po optike, lazernoi fizike i biofotonike. – Saratov: Izd-vo «Novyj veter», 2009. – P. 69-78.
 13. Zege Je. P. Perenos izobrazhenija v rasseivajushhej srede / Je. P. Zege, A. P. Ivanov, I. L. Kacev. – Minsk: Nauka i tehnika, 1975. – 327 p.
 14. Pushkareva A. E. Metody matematicheskogo modelirovaniia v optike biotkani. Uchebnoe posobie / A. E. Pushkareva. – SPb: SPbGU ITMO, 2008. – 103 p.

Надійшла до редакції 16.10.2017р.

КВАТЕРНЮК С. М. – к.т.н., доцент кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.