

**С. М. Кватернюк, к. т. н., доц.**

## **МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

*Підвищення точності опосередкованих вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах необхідно для задач екологічного моніторингу водних об'єктів, їх екотоксикологічного контролю, а також багатопараметричного контролю якості води. Використовуючи методіку математичного моделювання розсіювання світла у малокутовому наближенні у багатошарових неоднорідних середовищах, розв'язано пряму задачу визначення спектральних характеристик природних водних середовищ при зміні пігментних параметрів фітопланктону. У роботі досліджено процес опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах мультиспектральним методом та отримано регресійні рівняння, що дозволяють визначити співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом, а також співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом. Для цього використано процедуру множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних. Здійснено аналіз методичних та інструментальних похибок вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах під час використання у мультиспектральному засобі екологічного вимірювального контролю у якості джерела випромінювання світлодіодів, лазерних діодів та монохроматора. Обрано оптимальні варіанти реалізації засобів мультиспектрального екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону водних середовищ в залежності від вартості їх реалізації та загальної похибки вимірювання. Під час вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі найменшу загальну похибку 0,381% отримано для 6-ти каналного засобу мультиспектрального вимірювального контролю з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 20 нм. Під час вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі оптимальним варіантом реалізації засобу мультиспектрального екологічного контролю обрано 5-ти каналний засіб з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 20 нм, що дозволяє отримати загальну похибку вимірювань не більше 0,486%.*

**Ключові слова:** мультиспектральний метод, водні середовища, спектральні характеристики, пігменти, фітопланктон.

### **Вступ**

Вдосконалений мультиспектральний метод екологічного контролю природних водних середовищ полягає у аналізі цифрових зображень водних об'єктів, отриманих у декількох спектральних діапазонах [1 – 5]. Метод може використовуватись для опосередкованого вимірювання структурних та пігментних параметрів фітопланктону. Під час дослідження масиву мультиспектральних зображень можуть використовуватись зображення об'єктів контролю у відбитому світлі, а також флуоресцентні зображення [4]. Дослідження концентрації фітопланктону у водних об'єктах широко використовується у засобах супутникового моніторингу [5], які дозволяють швидко відслідковувати зміни у великих водних об'єктах. Окрім мультиспектральних камер для цього також використовують багатохвильові лідари [6]. Важливість теми обумовлена необхідністю дослідження впливу токсичних та біогенних речовин на стан фітопланктону у природних водних середовищах, постійного підвищення достовірності екологічного контролю впливу небезпечних відходів на водні об'єкти методом біоіндикації по фітопланктону для обґрунтування відповідних заходів екологічної безпеки. При цьому одним з важливих чинників, що негативно

впливають на якість поверхневих вод, є їх антропогенне евтрофування, яке на відміну від природного, є наслідком діяльності людини і полягає у швидкому підвищенні трофності водойм внаслідок надходження до них біогенних елементів і органічних речовин у кількостях, що значно перевищують звичайні природні рівні.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення точності опосередкованих вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах для задач екологічного моніторингу водних об'єктів, їх екотоксикологічного контролю, а також багатопараметричного контролю якості води.

**Метою дослідження** є вдосконалення мультиспектрального методу опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах.

#### Дослідження процесу опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах мультиспектральним методом

Використовуючи методику математичного моделювання розсіювання світла у малокутовому наближенні у багатошарових неоднорідних середовищах [7, 8], розв'яжемо пряму задачу визначення спектральних характеристик природних водних середовищ з відомими параметрами фітопланктону для двох випадків зміни пігментних параметрів фітопланктону у них, а саме:

а) співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі змінюється від 0,8 до 0,9; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом залишається незмінним 0,27;

б) співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі залишається незмінним 0,8; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом змінюється від 0,2 до 0,4.

У кожному з прикладів біомаса фітопланктону у водному середовищі 17,7 мг/л, вміст хлорофілу *a* у сирій масі фітопланктону приймаємо 0,5%. Спектральні характеристики показника поглинання, показника розсіювання та фактору анізотропії для водного середовища без фітопланктону введено у модель на основі апроксимації за результатами експериментальних досліджень. Спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону введено у математичну модель використовуючи лінійну інтерполяцію в Matchcad 13.0 на основі таблиці експериментальних даних вимірювань [9]. На рис. 1 наведено розраховані спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища за зміни пігментних параметрів фітопланктону.

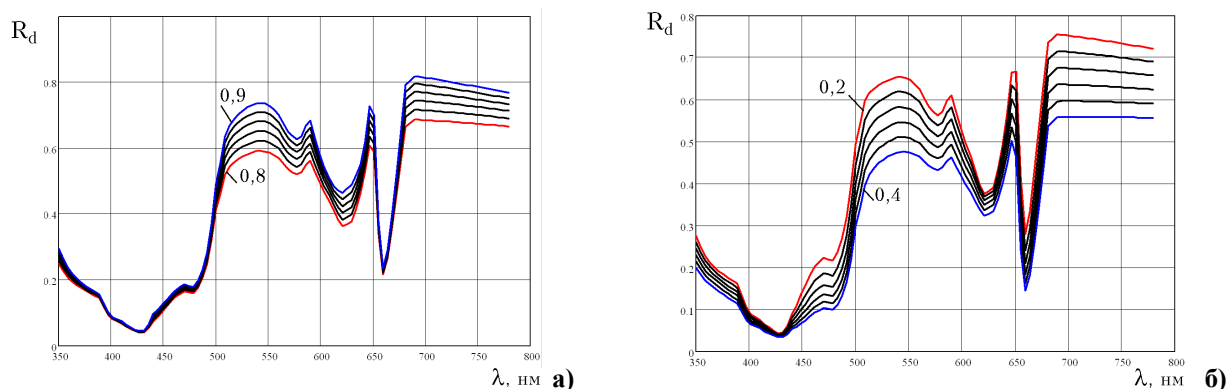


Рис. 1. Спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища за зміни пігментних параметрів фітопланктону: а) співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом від 0,8 до 0,9; б) співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом від 0,2 до 0,4

джерелами випромінювання і ширококутовою ПЗЗ камерою у кожному пікселі зображення буде отримано мультиспектральні параметри, що визначаються спектральними характеристиками джерела випромінювання, чутливості ПЗЗ камери та коефіцієнту дифузного відбиття об'єкту дослідження [10].

У якості джерел випромінювання використаємо лінійку світлодіодів, лінійку лазерних діодів та монохроматор зі щілиною, що забезпечує ширину смуги пропускання 5, 10 та 20 нм. У якості ПЗЗ камери використаємо MDC140BW з такими параметрами: розділова здатність 1,3 Мп, спектральний діапазон 350-1000 нм, динамічний діапазон 66 дБ. Спектральні характеристики джерел випромінювання і цифрової камери наведені у попередній роботі [10]. Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками при зміні пігментних параметрів фітопланктону та використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів наведено на рис. 2.

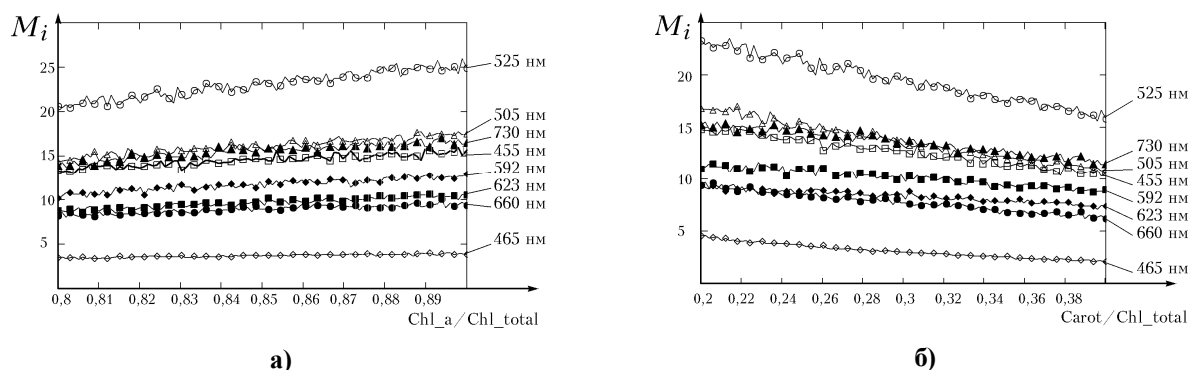


Рис. 2. Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками за зміни пігментних параметрів фітопланктону та використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів: а) співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом від 0,8 до 0,9; б) співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом від 0,2 до 0,4

Визначення пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах на основі мультиспектральних вимірювань виконаємо за допомогою множинної регресії. Вихідними даними для виконання множинної регресії є таблиця, у якій у якості вихідної (залежної) змінної є один з пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах, що змінюються у певному діапазоні з заданим кроком у ході математичного моделювання спектральних характеристик (розв'язку прямої оптичної задачі), а незалежними змінними є мультиспектральні параметри, отримані на етапі моделювання мультиспектральних телевізійних вимірювань. Вихідні дані для визначення співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Приклад вихідних даних для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії**

Chl a/Chl	M <sub>455</sub>	M <sub>465</sub>	M <sub>505</sub>	M <sub>525</sub>	M <sub>592</sub>	M <sub>623</sub>	M <sub>660</sub>	M <sub>730</sub>
0,8000	0,8451	0,8423	0,8299	0,7707	0,8405	0,7347	0,8306	0,8152
0,8010	0,8240	0,8168	0,7785	0,7801	0,7911	0,7902	0,8426	0,8088
0,8020	0,8560	0,8509	0,7916	0,7950	0,7970	0,7682	0,8260	0,8501
0,8030	0,8094	0,8343	0,8065	0,8001	0,8373	0,7928	0,8412	0,8739
0,8040	0,8783	0,8163	0,7905	0,7886	0,8039	0,8156	0,8482	0,8515
0,8051	0,8546	0,8391	0,7973	0,8261	0,8136	0,8095	0,8530	0,8475
0,8061	0,8547	0,8604	0,7675	0,7916	0,8331	0,7931	0,8322	0,8068

...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,8990	0,9852	0,9937	0,9546	0,9660	0,9474	0,9622	0,9702	0,9937
0,9000	0,9656	0,9338	1,0000	0,9645	0,9819	0,9567	0,9750	0,9983

З використанням покрокової регресії проаналізуємо незалежні змінні, що дозволяють найбільш точно визначити залежні змінні – пігментні параметри. Використано процедуру множинної регресії з покроковим внесенням незалежних змінних, що здійснює вибір незалежних змінних на кожному кроці додаючи чи видаляючи їх з моделі, враховуючи заданий користувачем критерій [12, 13]. На основі даних табл. 1 програма виконує покрокову множинну регресію у 8 кроків, поступово додаючи змінні, зважаючи на їх внесок у точність визначення заданого параметру. Результати розрахунків на кожному кроці множинної регресії наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунку множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі з покроковим додаванням змінних**

N	$\lambda$ , нм	F	$\Delta$	R
1	623	917,5048	0,9149797	0,95052421
2	623; 505	809,8696	0,7037207	0,97133801
3	623; 505; 592	713,5499	0,6165290	0,97830397
4	623; 505; 592; 455	662,5289	0,5565090	0,98254419
5	623; 505; 592; 455; 525	609,5619	0,5201907	0,98492687
6	623; 505; 592; 455; 525; 660	569,3224	0,4922263	0,98665912
7	623; 505; 592; 455; 525; 660; 465	538,3920	0,4692637	0,98801336
8	623; 505; 592; 455; 525; 660; 465; 730	489,7288	0,4605149	0,98858490

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі для різних варіантів джерел випромінювання отримано такі регресійні рівняння:

$$Chla / Chl_1 = 0,29787 + 0,16039M_{623} + 0,06336M_{505} + 0,19368M_{592} + 0,14549M_{455} + 0,17271M_{525} + 0,12526M_{660} + 0,10238M_{465} + 0,08851M_{730}, \quad (1)$$

$$Chla / Chl_2 = 0,33111 + 0,22585M_{530} + 0,17719M_{515} + 0,14727M_{650} + 0,14142M_{638} + 0,15618M_{520} + 0,09231M_{790} + 0,07662M_{450} + 0,03137M_{405}, \quad (2)$$

$$Chla / Chl_3 = 0,84395 + 0,81649M_{525} - 0,45051M_{660} - 0,20284M_{420} + 0,72046M_{680} - 0,3271M_{490} + 0,36594M_{355} - 0,81482M_{740} + 0,82842M_{690} - 0,13667M_{350} - 0,61912M_{775} + 0,51734M_{760} + 0,17554M_{570}, \quad (3)$$

$$Chla / Chl_4 = 0,83276 + 0,09019M_{630} - 0,21874M_{420} + 0,64834M_{510} - 0,48688M_{660} + 1,4328M_{680} - 0,10277M_{390} - 0,27049M_{430} - 1,12618M_{740} + 1,21003M_{700} - 0,23555M_{460} - 0,20729M_{370} + 0,17691M_{360}, \quad (4)$$

$$Chla / Chl_5 = 0,84915 + 1,68577M_{530} - 0,82097M_{670} - 0,5809M_{430} - 0,17872M_{410} + 1,0752M_{510} - 0,26958M_{470}, \quad (5)$$

де  $Chla/Chl_1$  – співвідношення між хлорофілом  $a$  та загальним хлорофілом під час використання у мультиспектральному засобі вимірювального контролю у якості джерела випромінювання світлодіодів;  $Chla/Chl_2$  – лазерних діодів;  $Chla/Chl_3$  – монохроматора, 5 нм;  $Chla/Chl_4$  – монохроматора, 10 нм;  $Chla/Chl_5$  – монохроматора, 20 нм.

У процесі множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі для різних варіантів джерел випромінювання отримано такі регресійні рівняння:

$$Carot / Chl_1 = 0,86138 - 0,09823M_{505} - 0,11656M_{660} - 0,10233M_{592} - 0,12034M_{525} - 0,16144M_{455} - 0,13776M_{730} - 0,19058M_{465} - 0,09215M_{623}, \quad (6)$$

$$Carot / Chl_2 = 0,85369 - 0,22387M_{450} - 0,2105M_{515} - 0,117M_{405} - 0,13637M_{530} - 0,12124M_{520} - 0,06657M_{638} - 0,0938M_{790} - 0,04778M_{650}, \quad (7)$$

$$Carot / Chl_3 = 0,27766 - 1,55723M_{495} + 0,43216M_{435} - 0,90252M_{540} + 0,42295M_{630} + 0,63618M_{470} + 0,40105M_{615} - 0,68175M_{695} - 0,47237M_{385} - 0,50621M_{395} + 0,4372M_{610} - 0,5911M_{535} - 1,05293M_{680} + 0,50642M_{780} + 1,34478M_{450} + 0,63184M_{415} + 0,84613M_{600} - 0,76279M_{575} + 1,0374M_{755} - 0,55564M_{530} - 0,75484M_{725} + 0,2128M_{350}, \quad (8)$$

$$Carot / Chl_4 = 0,31698 - 1,86827M_{500} + 1,06961M_{430} + 2,16797M_{470} + 0,75255M_{620} - 1,66055M_{550} - 0,68378M_{390} - 1,54955M_{670} + 0,83739M_{780}, \quad (9)$$

$$Carot / Chl_5 = 0,30716 + 1,06509M_{490} + 1,8995M_{430} - 3,44399M_{510} + 1,37479M_{630} - 1,82412M_{690}, \quad (10)$$

де  $Carot/Chl_1$  – співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом при використанні у мультиспектральному засобі вимірювального контролю у якості джерела випромінювання світлодіодів;  $Carot/Chl_2$  – лазерних діодів;  $Carot/Chl_3$  – монохроматора, 5 нм;  $Carot/Chl_4$  – монохроматора, 10 нм;  $Carot/Chl_5$  – монохроматора, 20 нм.

#### Аналіз методичних та інструментальних похибки вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у природних водних об'єктах

Методична похибка вимірювання  $\delta_m$  пігментних параметрів фітопланктону у природних водних об'єктах за використання множинної регресії визначається тим, наскільки точно отримане регресійне рівняння відображає залежність між залежною змінною – пігментними параметри фітопланктону у водному середовищі (у цій роботі співвідношенням між хлорофілом  $a$  та загальним хлорофілом і співвідношенням між каротиноїдами та загальним хлорофілом) та результатами мультиспектральних вимірювань. Отримані у процесі множинної регресії значення методичної похибки вимірювання при опосередкованому вимірюванні пігментних параметрів та використанні у мультиспектральному засобі вимірювального контролю у якості джерела випромінювання світлодіодів, лазерних діодів і монохроматора внесено до табл. 3.

Проаналізуємо інструментальний складник похибки вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у природних водних об'єктах за використання ПЗЗ камери типу MDC140BW на основі фотоматриці Sony ICX285AL з розрядністю 12 біт та співвідношенням сигнал/шум 66 дБ. При цьому складова похибки, зумовлена наявністю шумів та випадкових завад у ПЗЗ

камері [13]:

$$D_{s/n} = 20 \lg \left( \frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right), \quad \delta_{noiseccd} = 100\% / \left( 10^{D_{s/n}/20} \right), \quad (11)$$

де  $D_{s/n}$  – співвідношення сигнал/шум,  $A_{signal}$  – середньоквадратичне значення амплітуди сигналу,  $A_{noise}$  – середньоквадратичне значення амплітуди шумів та випадкових завад у ПЗЗ камері.

Похибка квантування  $\delta_{ADCccd}$  при великій кількості розрядів може бути описана рівномірним законом розподілу, що відповідає рівній щільності ймовірності похибки квантування в межах  $\pm h_k / 2$ , де  $h_k$  – крок квантування [14]:

$$\Delta_{ADCccd} = \pm \frac{u_{ref}}{2^n - 1}, \quad \delta_{ADCccd} = \frac{\Delta_{ADCccd}}{u_{ref}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де  $u_{ref}$  – опорна напруга,  $n$  – розрядність АЦП.

Середньоквадратичне значення похибки квантування [14]:

$$\delta_{SDADCccd} = \frac{\delta_{ADCccd}}{2\sqrt{3}}. \quad (13)$$

Визначимо випадкову складову інструментальної похибки вимірювання за умови, що похибки квантування і похибки, зумовлені наявністю шумів та випадкових завад є статистично незалежними:

$$\delta_{rand.Mi} = \sqrt{\delta_{noiseccd}^2 + \delta_{SDADCccd}^2}. \quad (14)$$

Випадкова складові інструментальної похибки для опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону визначається випадковими складовими похибки вимірювання у кожному із спектральних каналів, які потрапили у загальне регресійне рівняння, а також складовими, що враховують кореляційний зв'язок між мультиспектральними параметрами [15, 16]:

$$\delta_{instr.} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_{rand.Mi}^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} R_{ij} \delta_{rand.Mi} \delta_{rand.Mj}}, \quad (15)$$

де  $\delta_{rand.Mi}$ ,  $\delta_{rand.Mj}$  – випадкова складові похибки у  $i$ -тому і  $j$ -тому каналі;  $R_{ij}$  – коефіцієнт кореляції між мультиспектральними параметрами отримані після множинної регресії;  $N$  – загальна кількість каналів.

За використання ПЗЗ камери типу MDC140BW на основі фотоматриці Sony ICX285AL з розрядністю 12 біт та співвідношенням сигнал/шум 66 дБ складові похибки, зумовлені наявністю шумів та випадкових завад у ПЗЗ камері не більше  $\delta_{rand.Mi} = 0,0502\%$  [16].

Загальна похибка вимірювання пігментних параметрів фітопланктону водних середовищ буде визначатись сумою інструментальної і методичної похибок:

$$\delta_{genN} = \delta_{instr.} + \delta_m. \quad (16)$$

Результати розрахунку інструментальної і загальної похибки під час опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону водних середовищ внесені до табл. 3.

Таблиця 3

**Результати розрахунку похибок під час опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у водному середовищі**

Джерело випромінювання	Кількість спектральних каналів	Методична похибка, %	Інструментальна похибка, %	Загальна похибка, %
Співвідношення між хлорофілом <i>a</i> та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі				
Світлодіоди	8	0,461	0,4	0,861
Лазерні діоди	8	0,365	0,4	0,765
Монохроматор, 5 нм	12	0,115	0,6	0,715
Монохроматор, 10 нм	12	0,110	0,6	0,71
Монохроматор, 20 нм	6	0,126	0,255	0,381
Співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі				
Світлодіоди	8	0,403	0,353	0,756
Лазерні діоди	8	0,414	0,4	0,814
Монохроматор, 5 нм	21	0,226	0,261	0,487
Монохроматор, 10 нм	8	0,293	0,187	0,48
Монохроматор, 20 нм	5	0,320	0,166	0,486

**Висновки**

У результаті дослідження процесу опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах мультиспектральним методом отримано регресійні рівняння, що дозволяють визначити співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом, а також співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі. У ході покрокової множинної регресії отримано значення методичної похибки вимірювань пігментних параметрів фітопланктону та кількість спектральних каналів засобів мультиспектрального вимірювального контролю в залежності від типу джерел випромінювання. На основі отриманої кількості каналів та інструментальної похибки у кожному каналі отримано значення інструментальної та загальної похибок вимірювання пігментних параметрів фітопланктону. Варіанти реалізації мультиспектрального вимірювального контролю суттєво відрізнятимуться по вартості в залежності від кількості спектральних каналів та засобів, якими вони створюються. Наприклад, при вимірюванні співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі найменшу загальну похибку 0,381% отримано для 6-ти каналного засобу мультиспектрального вимірювального контролю з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 20 нм. При використанні 12-каналного засобу з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 5 нм значення методичної похибки зменшується, однак за рахунок збільшення кількості каналів інструментальна похибка зростає, що дає загальну похибку 0,715%, яка суттєво більша значення для 6-ти каналного засобу. При цьому, очевидно, що вартість 6-ти каналного засобу з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 20 нм буде суттєво менша, ніж 12-ти каналного з шириною спектрального діапазону 5 нм. При вимірюванні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі загальна похибка вимірювань практично не змінюється під час використання 21-го каналного засобу з шириною спектрального діапазону у кожному каналі 5 нм – 0,487%, 8-ми каналного засобу з шириною спектрального діапазону 10 нм – 0,48% та 5-ти каналного засобу з шириною спектрального діапазону 20 нм – 0,486%. Тому оптимальним варіантом для реалізації засобу мультиспектрального екологічного контролю співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону водних середовищ буде 5-ти каналний засіб з

шириною спектрального діапазону у кожному каналі 20 нм.

### 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 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в кожном покрове / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк [та ін.] // 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.
8. Зере Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде / Э. П. Зере, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск: Наука и техника, 1975. – 327 с.
9. 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.
10. 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.
11. Большаков А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учебное пособие для вузов / А. А. Большаков, Р. Н. Каримов. – М. : Горячая линия–Телеком, 2007. – 522 с.
12. Дубровская Л. И. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие / Л. И. Дубровская, Г. Б. Князев. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – 120 с.
13. Stathaki T. Image fusion: algorithms and applications / T. Stathaki. – New York: Academic Press, 2008. – 471 p.
14. Булатов В. Н. Элементы и узлы информационных и управляющих систем (основы теории и синтеза) : Учебное пособие / В. Н. Булатов. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 200 с.
15. Денисенко В. Суммирование погрешностей измерений в системах автоматизации / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации, 2012. – № 1. – С. 92 – 100.
16. Кватернюк С. М. Забезпечення екологічної безпеки стічних вод за допомогою мультиспектрального контролю їх токсичності з використанням біоіндикації по фітопланктону / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 6. – С. 9 – 16.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2018 р.

Стаття пройшла рецензування 12.03.2018 р.

**Кватернюк Сергій Михайлович** – к. т. н., доцент кафедри екології і екологічної безпеки.

Вінницький національний технічний університет.