

## ЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЧНА КІБЕРНЕТИКА ТА ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.064, 681.785

С. М. Кватернюк<sup>1</sup>

### МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ БІОМАСИ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Метою роботи є підвищення точності опосередкованих вимірювань біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах, використовуючи різні варіанти реалізації засобів мультиспектрального екологічного вимірювального контролю. Розв'язано зворотну задачу опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі результатів мультиспектральних вимірювань. Проведено аналіз похибок вимірювань біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах за різних варіантів реалізації засобів екологічного контролю. Для оцінювання трофічного статусу і екологічного контролю якості вод природних водних об'єктів використовують такі параметри фітопланктону: чисельність, біомаса, вміст хлорофілу та інших пігментів у сирій масі фітопланктону, співвідношення між основними пігментами, які дозволяють оцінювати продукційно-деструкційні процеси у водній екосистемі. У результаті розв'язку зворотної оптичної задачі визначення біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі мультиспектральних вимірювань отримано регресійні рівняння, які дозволяють опосередковано вимірювати біомасу фітопланктону з використанням у засобі екологічного контролю. У ході множинної регресії отримано кількість спектральних каналів засобу мультиспектрального вимірювального контролю, а також методичну похибку, яка визначається тим, наскільки точно регресійне рівняння дозволяє опосередковано виміряти біомасу фітопланктону. Так, з використанням у джерелі випромінювання світлодіодів та лазерних діодів отримано 7 і 8 спектральних каналів, відповідно. За використання як джерела випромінювання монохроматора отримано лише 3 спектральних канали. Отримане значення методичної похибки вимірювань, яке визначається регресійним рівнянням, є меншим за інструментальну похибку, що визначається аналого-цифровим перетворенням та шумами ПЗЗ камери. Розраховано загальну похибку опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі мультиспектральних вимірювань, що склала від 0,167 % до 0,397 % за різних варіантів реалізації засобу вимірювального контролю.

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

#### Вступ

Під час дослідження водних екосистем значну увагу приділяють фітопланктону, як основному продуценту первинної органічної речовини. Для оцінювання трофічного статусу і екологічного контролю якості вод природних водних об'єктів використовують такі параметри фітопланктону, як чисельність (тис. шт/мл), біомаса (мг/л), вміст хлорофілу  $a$  та інших пігментів у сирій масі фітопланктону (%), співвідношення між основними пігментами (хлорофіл  $a$ /хлорофіл  $b$ , каротиноїди/хлорофіл тощо), які дозволяють оцінювати продукційно-деструкційні процеси у водній екосистемі. При цьому чисельність частинок фітопланктону і його біомаса пов'язані через геометричні розміри частинок, їх об'єм та вагу.

Для прикладних задач екологічного контролю якості води використовують метод мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю [1]—[7], що полягає у аналізі масиву цифрових зображень водних об'єктів, отриманих у декількох визначених спектральних діапазонах, що дозволяє опосередковано виміряти основні структурні і пігментні параметри фітопланктону у водному середовищі. Мультиспектральний метод широко використовується для розв'язання прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної інженерії та контролю якості продукції.

Зокрема, у роботі [4] мультиспектральний метод використано для дослідження зображень біологічних об'єктів у відбитому випромінюванні та їх флуоресцентних зображень. Досліджувати просторовий розподіл концентрації фітопланктону у водних об'єктах з великою площею можливо за допомогою дистанційних мультиспектральних засобів супутникового моніторингу [5] чи з використанням багатохвильових лідарів [6]. Активно розвиваються алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для обробки мультиспектральних зображень, що дозволяє підвищити роздільну здатність та зменшити похибки під час визначення просторового розподілу пігментів у водних об'єктах [7]. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення точності опосередкованих вимірювань параметрів природних водних середовищ для задач екологічного контролю.

*Метою роботи* є підвищення точності опосередкованих вимірювань біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі результатів мультиспектральних вимірювань, використовуючи різні варіанти реалізації засобів екологічного контролю.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити біомасу фітопланктону у природних водних об'єктах на основі результатів мультиспектральних вимірювань;
- оцінити похибки вимірювань біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах за різних варіантів реалізації засобів екологічного контролю.

### Розв'язання зворотної задачі визначення біомаси фітопланктону у водних об'єктах на основі результатів мультиспектральних вимірювань

Використовуючи методику математичного моделювання розсіювання світла у малокутовому наближенні (МКН) у багат шарових неоднорідних біологічних середовищах [8], [9], спочатку розв'яжемо пряму задачу визначення спектральних характеристик природного водного середовища з відомими параметрами фітопланктону, а саме: біомаса фітопланктону змінюється від 17,7 до 35,4 мг/л; співвідношення між хлорофілом *a* та хлорофілом *b* у фітопланктоні 0,8; співвідношення між каротиноїдами та сумарним вмістом хлорофілів 0,27. При цьому вміст хлорофілу *a* у сирій масі фітопланктону візьмемо 0,5%. Спектральні характеристики показника поглинання, показника розсіювання та фактора анізотропії для водного середовища без фітопланктону, але з наявністю завислих частинок органічного походження апроксимовано на основі результатів експериментальних досліджень:

$$\mu_{s,w}(a) = 8,209 \cdot 10^3 \lambda^{-2,33} - 0,016 \lambda^{-0,494}; \quad (1)$$

$$\mu_{a,w}(\lambda) = 0,012 - 6,149 \cdot 10^{-5} \lambda + 9,482 \cdot 10^{-8} \lambda^2 - 3,429 \cdot 10^{-11} \lambda^3; \quad (2)$$

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

Спектральні характеристики показників поглинання основних пігментів фітопланктону введено у математичну модель з використанням лінійної інтерполяції в Mathcad 13.0 на основі таблиці експериментальних даних вимірювань [10]. На рис. 1 показано розраховані спектральні характеристики коефіцієнта дифузного відбиття на поверхні водного середовища.

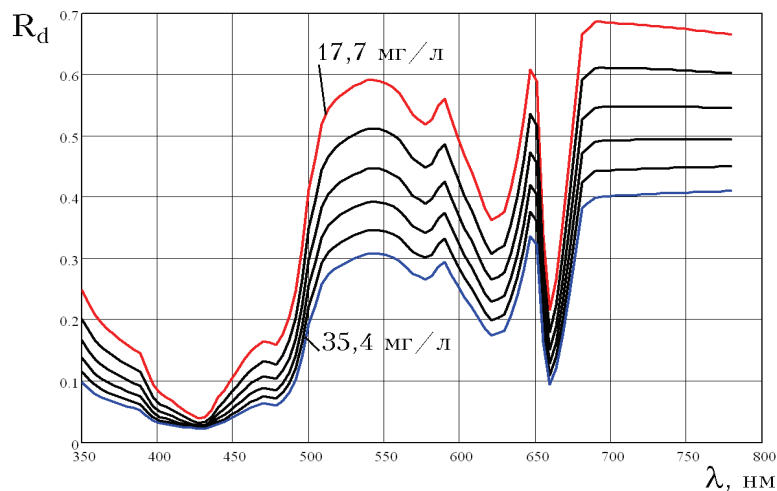


Рис. 1. Спектральні характеристики коефіцієнта дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища за зміни біомаси фітопланктону від 17,7 до 35,4 мг/л



мої оптичної задачі), а незалежними змінними є мультиспектральні параметри, отримані на етапі моделювання мультиспектральних телевізійних вимірювань. Приклад таблиці вихідних даних для визначення біомаси фітопланктону ( $B_1$ ) за мультиспектральними параметрами ( $M_{405}$ ,  $M_{450}$ ,  $M_{515}$ ,  $M_{520}$ ,  $M_{530}$ ,  $M_{638}$ ,  $M_{650}$ ,  $M_{790}$ ) подано у табл. 1 за умови використання ПЗЗ камери типу MDC140BW та джерела випромінювання на основі лазерних діодів.

Таблиця 1

Приклад вихідних даних для опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії

$B_1$ , г/л	$M_{405}$	$M_{450}$	$M_{515}$	$M_{520}$	$M_{530}$	$M_{638}$	$M_{650}$	$M_{790}$
0,0177	0,9912	1,0000	0,9861	1,0000	0,9965	1,0000	1,0000	1,0000
0,0179	1,0000	0,9693	1,0000	0,9461	1,0000	0,9754	0,9643	0,9470
0,0181	0,9653	0,9702	0,9894	0,9791	0,9852	0,9945	0,9344	0,9795
0,0182	0,9474	0,9075	0,9515	0,9624	0,9619	0,9703	0,9390	0,9411
0,0184	0,9345	0,9707	0,9922	0,9546	0,9532	0,9443	0,9479	0,9565
0,0186	0,9285	0,8887	0,9415	0,9522	0,9623	0,9747	0,9393	0,9315
0,0352	0,4164	0,3658	0,5016	0,4930	0,5223	0,4999	0,5603	0,6169
0,0354	0,3802	0,3659	0,5058	0,4993	0,5106	0,5224	0,5515	0,5959

Множинну регресію виконуємо у програмі STATISTICA 6.0. З використанням покрокової регресії проаналізуємо незалежні змінні (у цьому випадку, мультиспектральні параметри), що дозволяють найточніше визначити залежну змінну — біомасу фітопланктону. Використано процедуру множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних, що здійснює вибір незалежних змінних на кожному кроці, додаючи чи видаляючи їх з моделі виходячи із заданого користувачем критерію [12], [13]. Значення критерію Фішера  $F$  прийнято у програмі STATISTICA за замовчуванням, а саме, незалежна змінна включається у модель, якщо  $F > 1$ , і виключається з моделі, якщо  $F = 0$ . На основі даних табл. 1 програма виконує покрокову множинну регресію у 8 кроків поступово, додаючи змінні та зваживши їх внесок у точність визначення заданого параметра (у цьому випадку біомаси фітопланктону). Результати розрахунків на кожному кроці множинної регресії подано у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку множинної регресії для опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону з покроковим додаванням змінних

$N$	$\lambda$ , нм	$F$	$\Delta$	$R$
1	638	4432,337	0,0766762	0,98912489
2	638; 790	3514,393	0,0611377	0,99317041
3	638; 790; 405	2693,541	0,0570741	0,99411227
4	638; 790; 405; 530	2993,001	0,0469814	0,99605587
5	638; 790; 405; 530; 515	2652,588	0,0446552	0,99647502
6	638; 790; 405; 530; 515; 450	2296,073	0,0438224	0,99664167
7	638; 790; 405; 530; 515; 450; 520	2070,613	0,0427320	0,99684136
8	638; 790; 405; 530; 515; 450; 520; 650	1842,968	0,0423727	0,99692816

Після виконання множинної регресії необхідно перевірити незалежні змінні, які використовуються при виконанні регресії на наявність кореляційного зв'язку між собою, тобто здійснити перевірку мультиколінеарності.

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону у водних об'єктах для різних варіантів джерел випромінювання отримано такі регресійні рівняння:

$$\begin{aligned}
 B_1 = & 0,061950495 + 0,386150081457191M_{405} + 0,276867878443099M_{450} - \\
 & - 0,231009644925913M_{515} - 0,175023777740264M_{520} - 0,37688693408572M_{530} - \\
 & - 0,40062633562186M_{638} - 0,113570497075527M_{650} - 0,309392342645875M_{790};
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

$$B_2 = 0,060147315 + 0,151268904656432M_{455} + 0,379941373891926M_{465} - \\ - 0,211701511236841M_{525} - 0,31780818624996M_{592} - 0,328764791678969M_{623} - \\ - 0,300129166341354M_{660} - 0,373212890238047M_{730}; \quad (6)$$

$$B_3 = 0,028403235 + 1,13217462282112M_{430} - 3,2212249355994M_{495} + 1,11945171072207M_{675}; \quad (7)$$

$$B_4 = 0,027158591 - 2,69505374364036M_{360} + 1,43210469671405M_{430} + 0,293059147530282M_{680}; \quad (8)$$

$$B_5 = 0,027288548 + 1,50885912741774M_{430} - 5,09934500675211M_{630} + 2,62365718468988M_{770}, \quad (9)$$

де біомаса фітопланктону, визначена за мультиспектральними параметрами за використання джерела випромінювання на основі:  $B_1$  — лазерних діодів;  $B_2$  — світлодіодів;  $B_3$  — монохроматора, 5 нм;  $B_4$  — монохроматора, 10 нм;  $B_5$  — монохроматора, 20 нм;  $M_i$  — результати мультиспектральних вимірювань на  $i$ -й довжині хвилі (в нм),

Адекватність отриманих регресійних рівнянь була підтверджена на основі таблиці результатів експериментальних вимірювань біомаси фітопланктону мультиспектральним методом, при цьому мультиспектральні параметри отримані за використання всіх наведених джерел випромінювання, а біомаса фітопланктону у пробі визначена за допомогою світлового мікроскопу БІОЛІАМ Р-11 та лічильної камери Нажотта об'ємом 0,01 см<sup>3</sup>.

У ході множинної регресії отримано кількість спектральних каналів засобу мультиспектрального вимірювального контролю, а також методичну похибку, яка визначається тим, наскільки точно регресійне рівняння дозволяє опосередковано виміряти біомасу фітопланктону у математичній моделі, у якій повністю відсутня інструментальна похибка у вимірювальному каналі.

#### Аналіз похибок вимірювань біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах за різних варіантів реалізації засобів екологічного контролю

У результаті розрахунку множинної регресії для опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону з покроковим додаванням змінних отримано значення методичної похибки  $\delta_m$  (табл. 3). Випадкова складова інструментальної похибки для опосередкованого вимірювання біомаси 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 [14], [15]:

$$\delta_{instr.} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_{rand.Mi}^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j < i} R_{ij} \delta_{rand.Mi} \delta_{rand.Mj}}, \quad (10)$$

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

Використовуючи ПЗЗ камери типу MDC140BW на основі фотоматриці Sony ICX285AL з розрядністю 12-bit та співвідношенням сигнал/шум 66 дБ, складова похибки, зумовлена наявністю шумів та випадкових завад у ПЗЗ камері становить не більше  $\delta_{rand.Mi} = 0,0502\%$  [15].

Загальна похибка вимірювання біомаси фітопланктону буде визначатись сумою інструментальної і методичної похибок

$$\delta_{genN} = \delta_{instr.} + \delta_m. \quad (11)$$

Результати розрахунку інструментальної і загальної похибки при опосередкованому вимірюванні біомаси фітопланктону зведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку похибок при опосередкованому вимірюванні біомаси фітопланктону з покроковим додаванням змінних

Джерело випромінювання	Кількість спектральних каналів	Методична похибка, %	Інструментальна похибка, %	Загальна похибка, %
Світлодіоди	7	0,0473	0,35	0,397
Лазерні діоди	8	0,0423	0,4	0,442

Джерело випромінювання	Кількість спектральних каналів	Методична похибка, %	Інструментальна похибка, %	Загальна похибка, %
Монохроматор, 5 нм	3	0,0173	0,15	0,167
Монохроматор, 10 нм	3	0,0170	0,15	0,167
Монохроматор, 20 нм	3	0,0172	0,15	0,167

### Висновки

В результаті розв'язання зворотної оптичної задачі визначення біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі мультиспектральних вимірювань отримано регресійні рівняння, що дозволяють опосередковано виміряти біомасу фітопланктону за використання у засобі екологічного контролю різних варіантів джерел випромінювання. Так, за використання у джерелі випромінювання світлодіодів та лазерних діодів отримано 7 і 8 спектральних каналів, відповідно. У разі використання як джерела випромінювання монохроматора отримано лише 3 спектральних канали. Значення методичної похибки вимірювань, яке визначається регресійним рівнянням, отримано меншим за інструментальну похибку, що визначається аналого-цифровим перетворенням та шумами ПЗЗ камери. Розраховано загальну похибку опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону у природних водних об'єктах на основі мультиспектральних вимірювань, що склала від 0,167 до 0,397% в різних варіантах реалізації засобу вимірювального контролю.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V. Petruk et al., "The method of multispectral image processing of phytoplankton processing for environmental control of water pollution," *Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications*, vol. 98161N, pp. 1-5, December. 2015. doi: 10.1117/12.2229202.
- [2] V. Martsenyuk et al., "Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton," in *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016)*, Gyeongju, Korea, 2016, pp. 988-993.
- [3] V. Petruk et al., "Experimental studies of phytoplankton concentrations in water bodies by using of multispectral images," in *Water Supply and Wastewater Removal*. Lublin, Poland: Lublin University of Technology, 2016, pp. 161-171.
- [4] P. Symvoulidis et al., "Serial sectioning and multispectral imaging system for versatile biomedical applications," in *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, Beijing, China, 2014, pp. 890-893.
- [5] R. M. Kudela et al., "Application of hyperspectral remote sensing to cyanobacterial blooms in inland waters," *Remote Sensing of Environment*, no. 2, pp. 1-10, 2015.
- [6] S. Shi et al., "Improving Backscatter Intensity Calibration for Multispectral LiDAR," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 12, no. 7, pp. 1421-1425, 2015.
- [7] V. Starovoitov et al. "Multispectral image enhancement based on fusion and super-resolution," in *15th European Signal Processing Conference*, Poznan, Poland, 2007, pp. 2174-2178.
- [8] В. В. Барун и др. "Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в каждом покрове," на *12-й Международной молодежной научной школе по оптике, лазерной физике и биофотонике "Проблемы оптической физики и биофотоники"*. Саратов, РФ: Новый ветер, 2009, с. 69-78.
- [9] Э. П. Зеге, А. П. Иванов, и И. Л. Кацев, *Перенос изображения в рассеивающей среде*. Минск, СССР: Наука и техника, 1975. 327 с.
- [10] S. Ustin et al., "Retrieval of Foliar Information about Plant Pigment Systems from High Resolution," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp.67-77, 2009.
- [11] С. М. Кватернюк, «Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неорідних біологічних середовищ», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 15-22, 2017.
- [12] А. А. Большаков, Р. Н. Каримов, *Методы обработки многомерных данных и временных рядов*. Москва, РФ: Горячая линия-Телеком, 2007, 522 с.
- [13] Л. И. Дубровская, Г. Б. Князев, *Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики*. Томск, РФ: ТМЛ-Пресс, 2011, 120 с.
- [14] В. Денисенко. «Суммирование погрешностей измерений в системах автоматизации,» *Современные технологии автоматизации*, № 1, с. 92-100, 2012.
- [15] С. М. Кватернюк, «Забезпечення екологічної безпеки стічних вод за допомогою мультиспектрального контролю їх токсичності з використанням біоіндикації по фітопланктону,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 9-16, 2017.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.02.2018

**Кватернюк Сергій Михайлович** — канд. техн. наук, докторант доцент кафедри екології та екологічної безпеки, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. M. Kvaterniuk<sup>1</sup>

## Multispectral Measurements of Phytoplankton Biomass in Aqueous Media for Environmental Control Purposes

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

The aim of the work is to increase the accuracy of indirect measurements of phytoplankton biomass in natural water bodies on the basis of the results of multispectral measurements using various options for implementing environmental monitoring tools. The inverse problem of indirect measurement of phytoplankton biomass in natural water bodies is solved based on the results of multispectral measurements. The analysis of errors in biomass measurements of phytoplankton in natural water bodies is carried out under various options for the implementation of environmental monitoring tools. When studying aquatic ecosystems, considerable attention is paid to phytoplankton, as the main producer of primary organic matter. To assess the trophic status and ecological control of the quality of the waters of natural water bodies, phytoplankton parameters such as abundance, biomass, the content of chlorophyll and other pigments in the raw mass of phytoplankton, the ratio between the main pigments that allow us to evaluate the production-degradation processes in the aquatic ecosystem are used. As a result of solving the inverse optical problem of determining phytoplankton biomass in natural water bodies on the basis of multispectral measurements, regression equations have been obtained, which allow to indirectly measure the biomass of phytoplankton when used in environmental controls. In the course of multiple regression, the number of spectral channels of the multispectral measurement instrument is obtained, as well as the methodical error, which is determined by how accurately the regression equation allows indirectly measuring the biomass of phytoplankton. Thus, when light emitting diodes and laser diodes were used in the radiation source, 7 and 8 spectral channels were obtained, respectively. When using a monochromator as a radiation source, only 3 spectral channels are obtained. The value of the methodical measurement error, which is determined by the regression equation, is obtained less than the instrumental error, which is determined by the analog-to-digital conversion and the CCD camera noise. The general error of the indirect measurement of phytoplankton biomass in natural water bodies is calculated on the basis of multispectral measurements, which was from 0.167 to 0.397% for various versions of the measuring instrument.

**Keywords:** multispectral method, aqueous media, spectral characteristics, biomass, phytoplankton.

*Kvaterniuk Serghii M.* — Cand. Sc. (Eng.), Doctoral Student, Assistant Professor of the Chair of Ecology and Ecological Safety, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com

С. М. Кватернюк<sup>1</sup>

## Мультиспектральные измерения биомассы фитопланктона в водных средах для задач экологического контроля

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

Целью работы является повышение точности косвенных измерений биомассы фитопланктона в природных водных объектах при использовании различных вариантов реализации средств мультиспектрального экологического измерительного контроля. Решена обратная задача косвенного измерения биомассы фитопланктона в природных водных объектах на основе результатов мультиспектральных измерений. Проведен анализ погрешностей измерения биомассы фитопланктона в природных водных объектах при различных вариантах реализации средств экологического контроля. Для оценки трофического статуса и экологического контроля качества вод природных водных объектов используют такие параметры фитопланктона, как численность, биомассу, содержание хлорофилла и других пигментов в сырой массе фитопланктона, соотношение между основными пигментами, которые позволяют оценивать продукционно-деструкционные процессы в водной экосистеме. В результате решения обратной оптической задачи определения биомассы фитопланктона в природных водных объектах на основе мультиспектральных измерений были получены регрессионные уравнения, позволяющие косвенно измерить биомассу фитопланктона при использовании в качестве средства экологического контроля. В ходе множественной регрессии получено количество спектральных каналов средства мультиспектрального измерительного контроля, а также значение методической погрешности, что определяется тем, насколько точно регрессионное уравнение позволяет косвенно измерить биомассу фитопланктона. Так, при использовании в источнике излучения светодиодов и лазерных диодов получено 7 и 8 спектральных каналов соответственно. При использовании в качестве источника излучения монохроматора получено только 3 спектральных канала. Значение методической погрешности измерений, которое определяется регрессионным уравнением, получено меньше инструментальной погрешности, которая определяется аналого-цифровым преобразованием и шумами ПЗС камеры. Рассчитана общая погрешность косвенного измерения биомассы фитопланктона в природных водных объектах на основе мультиспектральных измерений, что составила от 0,167 % до 0,397 % при различных вариантах реализации средства измерительного контроля.

**Ключевые слова:** мультиспектральный метод, водные среды, спектральные характеристики, биомасса, фитопланктон.

*Кватернюк Сергей Михайлович* — канд. техн. наук, докторант, доцент кафедры экологии и экологической безопасности, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com