

ПРИЛАДИ

УДК 504.064, 681.785

Кватернюк С.М.

Вінницький національний технічний університет

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРОКОПТЕРА

У статті досліджено процес опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону в приповерхневому шарі водних об'єктів з використанням квадрокоптера з мультиспектральною камерою. Для врахування зміни спектральних характеристик освітлення здійснено нормування результатів вимірювань відносно об'єкта з відомими спектральними характеристиками коефіцієнта дифузного відбиття. У ході множинної регресії отримано регресійні рівняння, що дають змогу визначити пігментні параметри фітопланктону на основі обробки мультиспектральних зображень. Здійснено аналіз похибок вимірювань під час використання в засобі восьмиканальних мультиспектральних камер SMS. Вибрано оптимальні довжини хвиль спектральних каналів і їх кількість за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.

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

Постановка проблеми. Одним із важливих факторів, що негативно впливають на якість поверхневих вод, є їх антропогенне евтрофування, яке полягає у швидкому підвищенні трофності водойм унаслідок надходження до них біогенних елементів та органічних речовин у кількостях, що значно перевищують звичайні природні рівні. Антропогенне евтрофування призводить до надмірного заростання стоячих водойм і масового розвитку синьо-зелених водоростей, які викликають «цвітіння» води. Фітопланктон є одним із біоіндикаторів екологічного статусу водних об'єктів відповідно до Водної рамкової директиви (WFD) ЄС 2000/60 [1, с. 134]. Для гармонізації природоохоронної системи України з міжнародними вимогами необхідно вдосконалювати систему контролю антропогенного забруднення водних середовищ на основі біоіндикації по фітопланктону. Для подальших досліджень у роботі як тест-об'єкт обрано фітопланктон приповерхневого шару водних середовищ, а тест-параметрами – співвідношення між основними пігментними параметрами фітопланктону: хлорофілом а, загальним хлорофілом і каротиноїдами. Для підвищення достовірності контролю параметрів водних середовищ відповідно до завдань екологічного моніторингу з урахуванням їх оптико-фізичних характеристик необхідне вдосконалення мультиспектральних методів контролю та розроблення відповідних апаратно-програмних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи мультиспектрального вимірювального контролю посідають важливе місце під час вирішення прикладних задач екологічного моніторингу водних об'єктів. Проте натепер вони розвинуті недостатньо й потребують продовження досліджень з метою підвищення швидкодії та точності. У роботі [2, с. 1] запропоновано спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону з допомогою проточного мультиспектрального телевізійного вимірювального аналізатора частинок неперервної дії, при якому порівнюють зображення частинок на характеристичних довжинах хвиль пігментів за допомогою ПЗЗ-камери із зображеннями з бази даних у режимі реального часу, визначають чисельність частинок фітопланктону та розраховують індекси біорізноманіття. У праці [3, с. 196–205] мультиспектральний метод використовується для дистанційного супутникового екологічного контролю вмісту фітопланктону у водних об'єктах, що дало змогу аналізувати просторовий розподіл концентрації фітопланктону у водних об'єктах з високою роздільною здатністю. У роботі [4, с. 2174] запропоновано алгоритми обробки мультиспектральних зображень, що допомагають підвищити роздільну здатність і з більшою точністю визначити просторовий

розподіл певних пігментів у неоднорідних середовищах. Проведений аналіз наявних оптичних методів контролю параметрів водних середовищ показав їх недосконалість і неспроможність вирішення прикладної задачі для потреб екологічного моніторингу, що зумовило необхідність удосконалення методів і засобів мультиспектрального екологічного вимірювального контролю.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення точності вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах з використанням квадрокоптера за допомогою мультиспектрального методу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сутність методу мультиспектрального вимірювального контролю полягає в аналізі цифрових зображень досліджуваного об'єкта, отриманих у декількох спектральних діапазонах [5, с. 988–993]. Після обробки отриманого масиву мультиспектральних зображень необхідно опосередковано виміряти параметри водних середовищ у кожному пікселі зображення. Це здійснюється на основі розв'язання оберненої оптичної задачі з урахуванням математичної моделі неоднорідних водних середовищ. Математичні моделі трансформації світла в приповерхневому шарі водних середовищ урахують концентрації основних пігментів, структурні особливості приповерхневого шару, довжину хвилі падаючого випромінювання і ступінь його поляризації. Метод експериментальних досліджень та екологічного вимірювального контролю на основі обробки мультиспектральних зображень об'єкта отриманих ПЗЗ-камерою на характеристичних довжинах хвиль повинен забезпечувати з високою вірогідністю контроль стану об'єкта та його приповерхневої структури. Координати в мультиспектральному просторі визначаються на основі спектральних характеристик джерел випромінювання, фільтрів, фотоматриці й об'єкта контролю. За умови використання мультиспектральної камери зі світлофільтрами на входах елементів фотоматриці система рівнянь для визначення координат у n-вимірному мультиспектральному просторі буде:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_1(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ M_2 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_2(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ \dots \\ M_n = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_n(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

де $P(\lambda_i)$ – спектральна характеристика джерела випромінювання, $s_i(\lambda_i)$ – спектральна характе-

ристика i -того каналу мультиспектральної камери, $R_d(\lambda_i)$ – спектральна характеристика коефіцієнта дифузного відбиття об'єкта дослідження.

Спектральні характеристики коефіцієнта дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища розраховані в роботі С.М. Квартенюк [6, с. 15] у малокутовому наближенні для таких параметрів фітопланктону: співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом змінюється від 0,8 до 0,9; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом змінюється від 0,2 до 0,4. У кожному з прикладів біомаса фітопланктону 17,7 мг/л, уміст хлорофілу а в сирій масі фітопланктону прийнято 0,5%. Спектральні характеристики показника поглинання, показника розсіювання та фактору анізотропії для водного середовища без фітопланктону, але з наявністю завислих частинок органічного походження введено в математичну модель за допомогою апроксимації за результатами експериментальних досліджень. Як джерело випромінювання використовується природне сонячне випромінювання, усереднена спектральна характеристика щільності випромінювання якого з урахуванням поглинання в атмосфері наведена на рис. 1а. У засобі мультиспектрального екологічного контролю використано восьмиканальні мультиспектральні камери серії CMS (Silios Technologies, Франція) з такими параметрами [7, с. 1–5]: спектральний діапазон CMS-C 400–700 нм, CMS-V 550–850 нм, CMS-S 650–950 нм; роздільна здатність спектральних каналів 426 x 339; розрядність АЦП 10 біт; час експозиції від 10 мкс до 2 с; вага 59 г. Спектральна характеристика чутливості мультиспектральних камер серії CMS наведена на рис. 1 б–г.

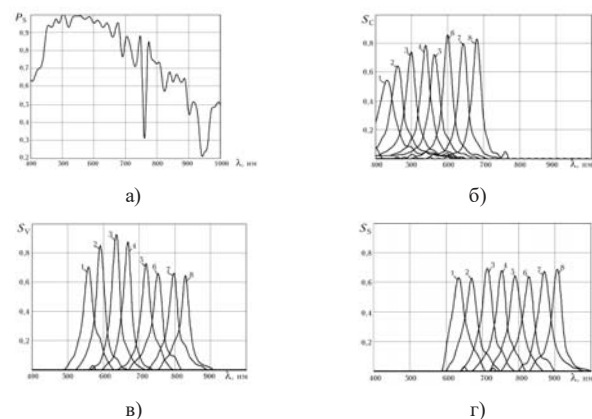


Рис. 1. Нормовані спектральні характеристики:
а) природного сонячного випромінювання;
б) чутливості спектральних каналів камери CMS-C;
в) чутливості спектральних каналів камери CMS-V;
г) чутливості спектральних каналів камери CMS-S

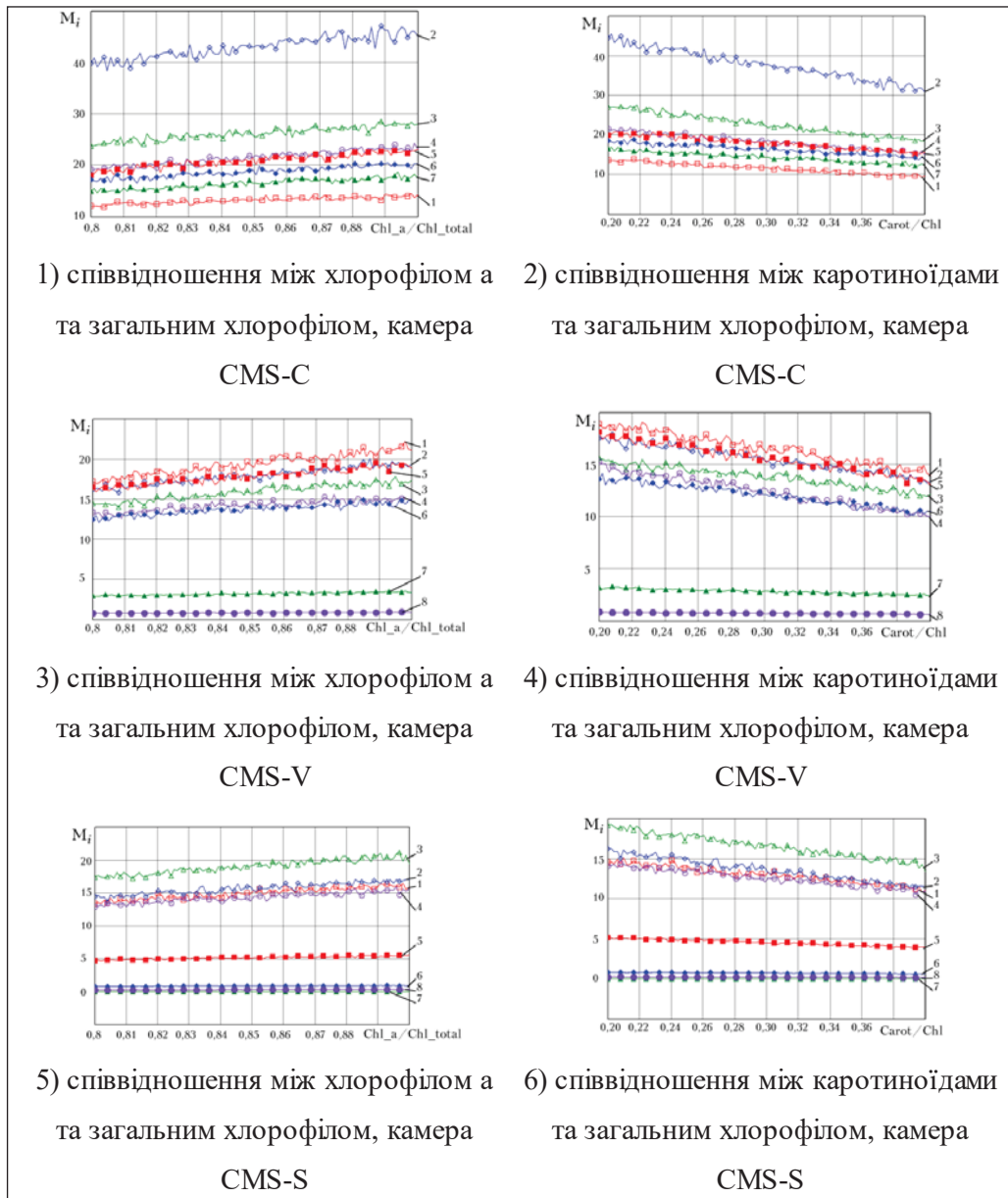


Рис. 2. Залежності мультиспектральних параметрів у разі зміни пігментних параметрів і використання мультиспектральних камер серії CMS

Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками в разі зміни пігментних параметрів фітопланктону й використання восьмиканальних мультиспектральних камер серії CMS різних типів наведено на рис. 2. Оскільки спектральні характеристики природного сонячного випромінювання на рівні водної поверхні постійно змінюються, то необхідно здійснювати нормування результатів мультиспектральних вимірювань з квадрокoptера відносно плаваючої платформи з білою дифузно відбиваючою поверхнею з покриттям на основі сульфату барію. Для опосередкованого

вимірювання біомаси фітопланктону за результатами мультиспектральних вимірювань використовуються лише нормовані значення мультиспектральних параметрів.

Розв'язання оберненої оптичної задачі для визначення пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах за результатами мультиспектральних вимірювань проведемо за допомогою множинної регресії в програмі STATISTICA 6.0. З використанням покрокової регресії проаналізуємо мультиспектральні параметри, що дають змогу найбільш точно визначити пігментні параметри фітопланктону Приклад результатів

Результати розрахунку множинної регресії

№ з/п	λ , нм	F	δm , %	R
1	713	661,6065	1,0579329	0,93326622
2	713, 669	655,1362	0,7772548	0,96492090
3	713, 669, 790	673,2844	0,6338839	0,97705078
4	713, 669, 790, 752	681,3346	0,5490373	0,98301378
5	713, 669, 790, 752, 827	644,5145	0,5062998	0,98572688
6	713, 669, 790, 752, 827, 906	604,4872	0,4780634	0,98742062
7	713, 669, 790, 752, 827, 906, 635	522,2490	0,4762857	0,98764968

розрахунку множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону за результатами мультиспектральних вимірювань при використанні камери типу CMS-C наведено в таблиці 1.

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі при використанні мультиспектральних камер серії CMS отримано такі регресійні рівняння:

$$Chl_a / Chl_{CMS_C} = 0,287843623 + 0,209036M_{C_4_536} + 0,195614M_{C_5_563} +$$

$$+ 0,149845M_{C_7_642} + 0,140127M_{C_6_600} + 0,110152M_{C_1_430} + 0,133364M_{C_2_461} + 0,112934M_{C_3_499},$$

$$Chl_a / Chl_{CMS_V} = 0,299045340 + 0,185920M_{V_2_593} + 0,217010M_{V_1_560} +$$

$$+ 0,153637M_{V_5_719} + 0,128180M_{V_7_795} + 0,111973M_{V_8_829} + 0,157482M_{V_3_635} + 0,087702M_{V_6_752},$$

$$Chl_a / Chl_{CMS_S} = 0,236112976 + 0,198943M_{S_3_713} + 0,190275M_{S_2_669} +$$

$$+ 0,173474M_{S_5_790} + 0,148602M_{S_4_752} + 0,134188M_{S_6_827} + 0,144415M_{S_8_906} + 0,063497M_{S_1_635}$$

де Chl_a / Chl_{CMS_C} , Chl_a / Chl_{CMS_V} , Chl_a / Chl_{CMS_S} – співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону, визначене за допомогою мультиспектральних камер CMS-C, CMS-V, CMS-S; $M_{i,j,k}$ – мультиспектральні параметри для камери і-того типу, j-того спектрального каналу, k-того значення довжини хвилі в нм.

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі при використанні мультиспектральних камер серії CMS отримано такі регресійні рівняння:

$$Carot / Chl_{CMS_C} = 0,904790007 - 0,195685M_{C_3_499} - 0,185798M_{C_2_461} -$$

$$- 0,180862M_{C_1_430} - 0,092616M_{C_6_600} - 0,123390M_{C_5_563} - 0,108316M_{C_7_642} - 0,129950M_{C_4_536},$$

$$Carot / Chl_{CMS_V} = 0,990208189 - 0,189790M_{V_4_669} - 0,147313M_{V_1_560} -$$

$$- 0,143672M_{V_6_752} - 0,119588M_{V_8_829} - 0,132849M_{V_5_719} - 0,122272M_{V_7_795} - 0,098624M_{V_2_593} - 0,064820M_{V_3_635},$$

$$Carot / Chl_{CMS_S} = 0,976892083 - 0,208828M_{S_3_713} - 0,212616M_{S_2_669} -$$

$$- 0,115506M_{S_5_790} - 0,172868M_{S_4_752} - 0,159507M_{S_6_827} - 0,147343M_{S_8_906},$$

де $Carot / Chl_{CMS_C}$, $Carot / Chl_{CMS_V}$, $Carot / Chl_{CMS_S}$ – співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону, визначене за допомогою мультиспектральних камер CMS-C, CMS-V, CMS-S; $M_{i,j,k}$ – мультиспектральні параметри для камери і-того типу, j-того спектрального каналу, k-того значення довжини хвилі в нм.

Інструментальний складник похибки вимірювань при використанні цифрових камер зумовлений наявністю шумів і випадкових завад у камері, а також похибкою квантування й визначаються за формулами, наведеними в роботі С.М. Кватернюк [8, с. 9–16]. Для мультиспектральних камер серії CMS зі співвідношенням сигнал/шум 60 дБ похибка, зумовлена наявністю шумів і випадкових завад у камері, становитиме 0,1%. Середньоквадратичне значення похибки квантування для камери з розрядністю АЦП 10 біт становитиме 0,014%. При цьому інструментальний складник похибки в кожному зі спектральних каналів становитиме 0,101%.

Інструментальний складник похибки мультиспектральних вимірювань визначається складниками похибки вимірювання в кожному зі спектральних каналів [9, с. 97]:

**Аналіз похибок мультиспектральних вимірювань пігментних параметрів
фітопланктону у водних середовищах**

N	$\delta_{instr.}, \%$	CMS-C		CMS-V		CMS-S	
		$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$	$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$	$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$
Співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону							
1	0,175	0,897	1,072	0,849	1,024	1,058	1,233
2	0,247	0,658	0,905	0,64	0,887	0,777	1,024
3	0,303	0,562	0,865	0,539	0,842	0,634	0,937
4	0,35	0,529	0,879	0,51	0,86	0,549	0,899
5	0,391	0,503	0,894	0,482	0,873	0,506	0,897
6	0,428	0,476	0,904	0,459	0,887	0,478	0,906
7	0,463	0,459	0,922	0,449	0,912	0,476	0,939
Співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону							
1	0,175	0,981	1,156	1,062	1,237	1,161	1,336
2	0,247	0,695	0,942	0,791	1,038	0,805	1,052
3	0,303	0,575	0,878	0,673	0,976	0,668	0,971
4	0,35	0,528	0,878	0,616	0,966	0,592	0,942
5	0,391	0,5	0,891	0,568	0,959	0,533	0,924
6	0,428	0,471	0,899	0,533	0,961	0,5	0,928

$$\delta_{instr.} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_{rand.Mi}^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} R_{ij} \delta_{rand.Mi} \delta_{rand.Mj}}, \quad (8)$$

де $\delta_{rand.Mi}$, $\delta_{rand.Mj}$ – випадкова складова похибки в *i*-тому й *j*-тому каналі; R_{ij} – коефіцієнт кореляції між мультиспектральними параметрами, отриманими після множинної регресії; *N* – загальна кількість каналів.

Загальна похибка вимірювань пігментних параметрів фітопланктону буде визначатись сумою інструментальної й методичної похибок:

$$\delta_{gen} = \delta_{instr.} + \delta_m. \quad (9)$$

Розраховані значення інструментального складника похибки мультиспектральних вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах, значення методичного складника похибки, визначені за результатами розрахунку множинної регресії для різних камер серії CMS, і загальна похибка вимірювань наведені в таблиці 2. Зі зростанням кількості спектральних каналів інструментальний складник похибки вимірювань зростає, а методичний – зменшується. Оптимальну кількість спектральних каналів і їх довжини хвиль можна обрати за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.

Під час вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону за допомогою мультиспектральної камери мінімальну загальну похибку отримано для триканального засобу вимірювального

контролю з використанням камери типу CMS-C і робочих довжин хвиль 536, 563 та 642 нм. Під час вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону мінімальну загальну похибку отримано для триканального засобу з використанням камери типу CMS-C і робочих довжин хвиль 499, 461 і 430 нм.

Висновки. У статті вдосконалено метод екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону в приповерхневому шарі природних водних середовищ під час вимірювань в умовах *in situ* з використанням квадрокоптера з мультиспектральною камерою. Здійснено розв'язок оберненої оптичної задачі для визначення пігментних параметрів фітопланктону в природних водних середовищах за результатами мультиспектральних вимірювань при використанні восьмиканальних мультиспектральних камер серії CMS (Silios Technologies) та отримано відповідні регресійні рівняння. У процесі порівняння значення методичної похибки вимірювання пігментних параметрів фітопланктону для камер цієї серії, що працюють у різних діапазонах довжин хвиль, найменше значення отримано для камери, що працює в діапазоні 400–700 нм (CMS-C). Обрано оптимальні довжини хвиль спектральних каналів і їх кількість під час опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.

Список літератури:

1. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: Вид. офіційне. Київ: Твій формат, 2006. 240 с.
2. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону: пат. 99580 Україна: МПК G01N 21/21 (2006.01). № u201500058; заява 05.01.2015; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11. 5 с.
3. Kudela R.M., Palacios S.L., Austerberry D.C. et al. Application of hyperspectral remote sensing to cyanobacterial blooms in inland waters. *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 167. P. 196–205.
4. Starovoitov V., Makarau A., Zakharov I. et al. Multispectral image enhancement based on fusion and super-resolution. *15th European Signal Processing Conference, Poland, Poznan*. 2007. P. 2174–2178.
5. Martsenyuk V., Petruk V.G., Kvaternyuk S.M. et al. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton. *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016), Korea, Gyeongju 2016*, P. 988–993.
6. Кватернюк С.М. Дослідження впливу пігментних параметрів на спектральні характеристики природних водних середовищ для задач екологічного контролю. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2017. № 2. С. 15–19.
7. CMS: Multi-spectral camera. Product Manual [Electronic resource]. URL: <https://www.silios.com/download> (дата звернення: 24.07.2018).
8. Кватернюк С.М. Контроль екологічної безпеки стічних вод за допомогою мультиспектрального методу та біоіндикації по фітопланктону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 6. С. 9–16.
9. Денисенко В. Суммирование погрешностей измерений в системах автоматизации. *Современные технологии автоматизации*. 2012. № 1. С. 92–100.

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧЕСЬКИЙ КОНТРОЛЬ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРОВ ФІТОПЛАНКТОНА В ВОДНИХ СРЕДАХ С ІСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА

В статье исследован процесс косвенного измерения пигментных параметров фитопланктона в приповерхностном слое водных объектов с использованием квадрокоптера и мультиспектральной камеры. Для учета изменения спектральных характеристик освещения осуществлено нормирование результатов измерений относительно объекта с известными спектральными характеристиками коэффициента диффузного отражения. В ходе множественной регрессии получены регрессионные уравнения, позволяющие определить пигментные параметры фитопланктона на основе обработки мультиспектральных изображений. Осуществлен анализ погрешностей измерений при использовании в средстве восьмиканальных мультиспектральных камер CMS. Выбраны оптимальные длины волн спектральных каналов и их количество из условия обеспечения минимального значения общей погрешности.

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

MULTISPECTRAL ECOLOGICAL CONTROL OF PIGMENT PARAMETERS OF PHYTOPLANKTON IN AQUEOUS MEDIA USING QUADROCOPTER

The process of indirect measurement of pigment parameters of phytoplankton in the near-surface layer of water objects using a quadrocopter with multispectral camera was studied. In order to take into account the change in the spectral characteristics of the illumination, the results of measurements with respect to the object with known spectral characteristics of the diffuse reflection coefficient are normalized. In the course of multiple regression, regression equations were obtained that allow to determine the pigment parameters of phytoplankton on the basis of processing of multispectral images. The analysis of errors of measurements is carried out at use in the means of eight-channel multispectral CMS cameras. Optimal wavelengths of spectral channels and their number are selected from the condition of ensuring a minimum value of the total error.

Key words: multispectral method, aqueous media, spectral characteristics, pigments, phytoplankton.