

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Кватернюк С.М., Петрук В.Г.
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця
petrukvg@gmail.com

Удосконалено методи та засоби мультиспектрального екологічного вимірювального контролю параметрів неоднорідних водних середовищ, які у сукупності забезпечують комплексне розв'язання завдань управління екологічною безпекою водних об'єктів. Розвинуті теоретичні та практичні основи дослідження екологічного стану неоднорідних водних середовищ, завдяки чому розв'язана задача підвищення достовірності контролю параметрів неоднорідних водних середовищ відповідно до задач екологічного моніторингу з урахуванням їх оптико-фізичних характеристик.

Мультиспектральний екологічний контроль інтегральних параметрів забруднення водних об'єктів. Кватернюк С.М., Петрук В.Г. Усовершенствованы методы и средства мультиспектрального экологического измерительного контроля параметров неоднородных водных сред, которые в совокупности обеспечивают комплексное решение задач управления экологической безопасностью водных объектов. Развита теоретическая и практическая основы исследования экологического состояния неоднородных водных сред, благодаря чему решена задача повышения достоверности контроля параметров неоднородных водных сред в соответствии с задачами экологического мониторинга с учетом их оптико-физических характеристик.

Multispectral ecological control of integral parameters of water bodies pollution. Kvaterniuk S.M., Petruk V.H. Methods and means of multispectral ecological measuring control of parameters of inhomogeneous water environments are improved, which together provide a comprehensive solution to the tasks of managing the ecological safety of water bodies. The theoretical and practical bases for the study of the ecological state of inhomogeneous aqueous media have been developed, which has made it possible to increase the reliability of monitoring parameters of inhomogeneous aqueous media in accordance with the objectives of environmental monitoring, taking into account their optical-physical characteristics.

Постановка проблеми. При гармонізації природоохоронної системи України із законодавством ЄС у зв'язку із зобов'язаннями України та відповідно до міжурядових угод необхідно удосконалювати систему контролю антропогенного забруднення водних середовищ [1]. При цьому отримати інтегральний параметр, що характеризує токсичну дію всіх присутніх у воді забруднювальних речовин – токсичність, можна отримати лише методом біотестування. З метою забезпечення екологічної безпеки стічних вод необхідно створення системи контролю їх токсичності, що дасть змогу оцінювати ефективність роботи очисних споруд та обґрунтувати способи очищення стічних вод, визначати гранично допустимі скиди для промислових об'єктів, оцінювати екологічний стан природних вод, оцінювати токсичність хімічних матеріалів, оцінювати ефективність природоохоронних заходів на території промислового об'єкта [2]. Удосконалення методів та засобів мультиспектрального екологічного вимірювального контролю параметрів неоднорідних водних середовищ, які у сукупності забезпечують комплексне розв'язання завдань управління екологічною безпекою водних об'єктів, є актуальною науково-при-

кладною проблемою, вирішенню якої присвячена ця робота.

Актуальність дослідження. Тому необхідно підвищувати достовірність контролю параметрів неоднорідних водних середовищ відповідно до задач екологічного моніторингу з урахуванням їх оптико-фізичних характеристик шляхом вдосконалення мультиспектральних методів та розроблення відповідних апаратно-програмних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із важливих складових частин моніторингу та контролю якості вод є комплексна оцінка екологічного стану поверхневих водних об'єктів, що підлягають антропогенному забрудненню [3]. Найбільш поширеними методами, які застосовуються для зазначених цілей, є розрахунок коефіцієнта забрудненості води та екологічного індексу якості води, недостатня ефективність яких пов'язана з використанням обмеженого переліку показників, що не дає змоги отримати ґрунтовну комплексну оцінку стану абіотичної та біотичної складових частин водної екосистеми. Інтегральну оцінку біологічної повноцінності води як середовища мешкання біоти з урахуванням різних проявів взаємодії хімічних речовин – адитивності,

синергізму, антагонізму, можна отримати за допомогою методу біотестування, який набув поширення у природоохоронній практиці багатьох країн, коли суспільство усвідомило небезпеку для здоров'я людей через забруднення води токсичними речовинами [3]. Актуальність використання екоотоксикологічного методу при здійсненні водоохоронних заходів підтверджується положеннями Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЄС, яка встановлює структуру дій країн ЄС у галузі водної політики. Стратегія запобігання забруднення води має базуватись виключно на водній екоотоксичності та оцінці ризику токсичності води для людей через водне середовище [4].

Для біологічної оцінки токсичності води існують ряд методів і засобів із використанням різноманітних тест-організмів. Зокрема, у роботах [5; 6] запропоновано способи біологічної оцінки токсичності води з використанням як тест-об'єктів церіодафній (*Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg), при цьому як показник фізіологічного стану церіодафній використовують чисельність живих рухомих церіодафній чи середню частоту рухів їх епіподіїв [6]. У роботі [7] запропоновано спосіб біологічної оцінки токсичності води з використанням як тест-об'єктів інфузорій та вдосконалено лазерно-доплерівський пристрій для дослідження їх руху, тест-параметри – середня швидкість руху частинок та частка клітин, що рухаються. У роботі [8] запропоновано спосіб біологічної оцінки токсичності води за допомогою біолюмінесцентних бактерій (*Photobacterium phosphoreum*, *Photobacterium leiognathi* або *Vibrio fischeri*), тест-параметр – інтенсивність біолюмінесценції. Прилад «Біотокс-10» призначений для токсикологічної оцінки середовищ і матеріалів, проведення екологічної розвідки об'єктів навколишнього середовища з використанням мікробних біолюмінесцентних сенсорів [2]. У роботах [9; 10] запропоновано способи біологічної оцінки токсичності води за допомогою молюсків. В «Автоматизованому біомоніторингу водного середовища з використанням реакцій двостулкових молюсків» [10] запропоновано пристрій для біологічної оцінки токсичності води за таким тест-параметром, як порівняна кількість молюсків із закритими стулками. У джерелі «Пристрій для оцінки токсичності стічних вод» [11] запропоновано способи та пристрої біологічної оцінки токсичності води за допомогою риб, що включають резервуар для розміщення риб-індикаторів, які переміщуються з однієї частини резервуару в іншу залежно від токсичності води. У джерелі «Спосіб визначення впливу токсичності стічних вод на водні солоні середовища» [12] запропоновано способи та пристрої біологічної оцінки токсичності води за допомогою визначення показників росту морських одноклітинних водоростей (*Platymonas viridis* Rouch або *Dunaliella salina* Teod.), тест-параметр – чисельність клітин.

У Директиві 2000/60/ЄС [4] макрофіти розглядаються як важливий «елемент якості для класифікації екологічного статусу» природних та «екологічного потенціалу» сильно змінених та штучних водних об'єктів. При цьому стосовно річок і озер як «елемент біологічної якості» рекомендується використовувати вищі водяні рослини. При цьому одним із найбільш характерних індикаторів забруднення поверхневих вод є макрофіти, стан яких адекватно відображає якість водних екосистем [13].

Проведений аналіз наявних методів та засобів контролю токсичності водних середовищ показав, що їх загальним недоліком є низька достовірність контролю, пов'язана з недостатньою точністю вимірювання тест-параметрів. Для подальших досліджень як тест-об'єкт обрано фітопланктон (*Chlorella vulgaris*) і макрофіти (*Lemna minor*), а тест-параметрами обрано концентрацію біомаси та співвідношення між пігментами.

Метою роботи є підвищення достовірності контролю параметрів неоднорідних водних середовищ шляхом вдосконалення методів мультиспектрального вимірювального контролю та відповідного забезпечення екологічної безпеки.

Виклад основного матеріалу. Суть методу мультиспектрального вимірювального контролю та діагностування полягає в аналізі цифрових зображень досліджуваного об'єкта, отриманих у кількох спектральних діапазонах [14; 15]. Для отримання мультиспектральних зображень об'єкта контролю необхідно розв'язати пряму оптичну задачу. При відомих параметрах неоднорідного водного середовища у процесі математичного моделювання необхідно отримати його спектральні характеристики. Загальна схема розв'язку прямої задачі вимірювання мультиспектральних параметрів водного середовища з відомими характеристиками наведена на рис. 1. Спектральні характеристики хромофорів та розчинених речовин вводяться у математичну модель за довідниковими даними з використанням сплайн апроксимації. На основі цих даних за методикою [16] розраховуємо оптичні характеристики кожного з шарів неоднорідного водного середовища та загальні оптичні характеристики для коефіцієнту дифузного відбивання $R(\lambda)$ чи направленого пропускання $T(\lambda)$ з урахуванням впливу усіх шарів. На основі отриманого коефіцієнту дифузного відбивання чи направленого пропускання з урахуванням спектральних характеристик камери $E(\lambda)$, фільтрів $T_f(\lambda)$ та джерела випромінювання $\Phi(\lambda)$ отримуємо мультиспектральні параметри $D(M_1, M_2, \dots, M_n)$ у кожному пікселі мультиспектрального зображення.

Загальна схема оцінювання достовірності мультиспектрального контролю параметрів неоднорідних водних середовищ, отриманих після розв'язку

оберненої оптичної задачі, наведена на рис. 2. Для отримання тест-параметрів для водних середовищ із мультиспектральних зображень необхідно розв'язати обернену оптичну задачу. Це буде проведено

за допомогою множинної регресії; нейромережі та нейро-нечіткої мережі. Іншим варіантом реалізації мультиспектрального контролю є багатопараметричний контроль безпосередньо за результатами

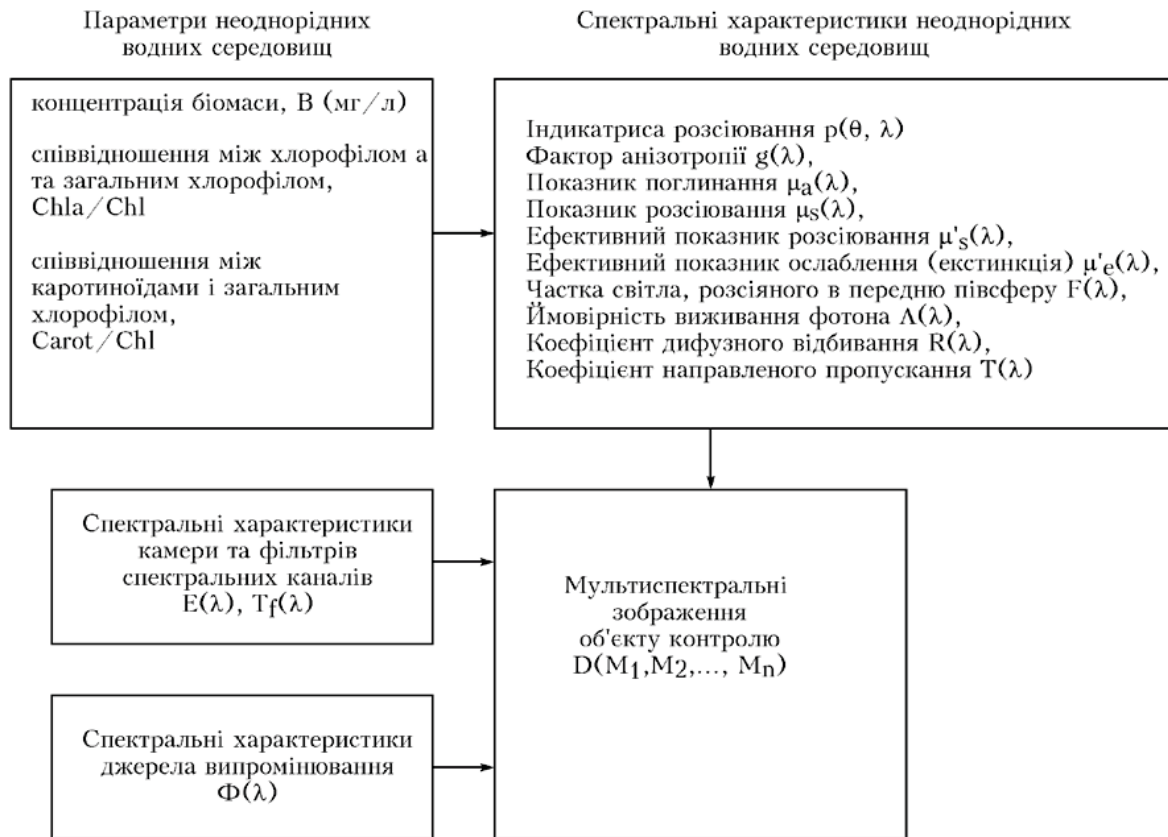


Рис. 1. Схема розв'язку прямої задачі вимірювання мультиспектральних параметрів водного середовища з відомими характеристиками



Рис. 2. Схема оцінювання достовірності мультиспектрального контролю параметрів водних середовищ

мультиспектральних вимірювань без використання регресійного рівняння.

Метод мультиспектрального контролю токсичності з використанням біоіндикації по фітопланктону зводиться до такої послідовності дій:

– відбирають проби досліджуваного водного середовища, що містить розчинені токсичні забруднювальні речовини, у пробу додають культуру фітопланктону;

– поверхню водного середовища освітлюють джерелом із рівномірним спектром випромінювання від 270 до 1200 нм;

– формують мультиспектральні зображення поверхні середовища на характеристичних довжинах хвиль за допомогою ширококугової ПЗЗ-камери та перемикаємого вузькосмугового оптичного фільтра;

– аналізують отримані мультиспектральні зображення, що дає змогу опосередковано виміряти значення тест-параметрів для контрольної і досліджуваної проби (I_c, I_e) за результатами мультиспектральних вимірювань;

– розраховують індекс токсичності $T = 100\% (I_c - I_e) / I_c$.

Зовнішній вигляд розроблених лабораторних макетних зразків засобів мультиспектрального контролю наведено на рис. 3. При використанні у лабораторному зразку засобу мультиспектрального екологічного контролю токсичності водних середовищ на основі біоіндикації по фітопланктону, наведеному на рис. 3а, чотирьох спектральних каналів із довжинами хвиль 450, 470, 530 та 660 нм отримано значення достовірності контролю токсичності 0,97, при використанні як джерел випромінювання лазерних діодів.

Метод мультиспектрального вимірювального контролю забруднення водних об'єктів за допомогою ряски малої полягає у визначенні порівняних розмірів зон водного середовища, які відповідають рослинам ряски без змін, із морфологічними змінами і чистій поверхні води, за допомогою аналізу

мультиспектральних зображень із подальшим розрахунком індексів токсичності [15]. Рослини ряски малої (*Lemna minor* L.) поміщають у модельне водне середовище у кюветі, яка розміщена у інтегровальній сфері на підложці з дифузно відбиваючим покриттям. Світлодіодні джерела випромінювання забезпечують рівень освітленості, достатній для нормальної життєдіяльності рослин ряски малої. Об'єкт дослідження освітлюється дифузно розсіяним світлом, відбитим від стінок інтегровальної сфери. Давач температури та нагрівальний елемент призначені для підтримки оптимальної температури у модельному водному середовищі. Модельні водні середовища з листцями ряски малої витримують протягом 7–14 діб при заданій температурі і освітленні. Визначаються порівняні розміри зон водного середовища, які відповідають листцям ряски без морфологічних змін (А), із морфологічними змінами (В) і чистій поверхні води (С), за допомогою аналізу мультиспектральних зображень поверхні модельних водних середовищ на характеристичних довжинах хвиль хромофорів ряски. Мультиспектральні зображення отримують за допомогою освітлення поверхні водних середовищ світлодіодними джерелами на характеристичних довжинах хвиль хромофорів (хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів). Підраховують кількість пікселів та порівнюють частину зображення для кожної із вказаних зон і розраховують тест-параметр для контрольної і досліджуваної проби $I_{c,e} = B_{c,e} \cdot 100\% / (A_{c,e} + B_{c,e})$, що дає змогу розрахувати індекс токсичності.

Лабораторний зразок засобу мультиспектрального екологічного контролю токсичності водних середовищ на основі ряски малої рис. 3б виготовлено на основі ПЗЗ-камери MDC140B із розділовою здатністю 1360x1024 та спектральним діапазоном 350–1000 нм. Освітлення об'єкта контролю здійснювалось світлодіодними джерелами випромінювання з довжинами хвиль 465, 525, 590 625, 820 та 860 нм. При використанні у засобі контролю токсичності



а)



б)

Рис. 3. Зовнішній вигляд розроблених лабораторних макетних зразків засобів мультиспектрального контролю

шести спектральних каналів отримано значення достовірності контролю токсичності 0,95.

Головні висновки. Проведений аналіз сучасних методів і засобів екоотоксикологічного контролю природних водних об'єктів показав, що їх загальним недоліком є низька достовірність контролю, пов'язана з недостатньою точністю вимірювання тест-параметрів. Для подальших досліджень як тест-об'єкти обрано фітопланктон та вищі водні рослини, а тест-параметрами, за якими здійснюється контроль забруднення, обрано концентрацію біомаси та співвідношення між пігментами. Наявні оптичні методи контролю параметрів водних середовищ є недосконалими та неспроможні вирішити поставлену задачу, що зумовило необхідність вдосконалення методів та засобів мультиспектрального контролю. Отримані результати розв'язання прямої оптичної задачі дають змогу пов'язати параметри водних середовищ з їх спектральними характеристиками. Своєю чергою, це дає змогу розв'язати обернену задачу визначення параметрів водних середовищ із результатів мультиспектральних вимірювань, тобто опосередковано вимірювати мультиспектральним методом параметри водних об'єктів для задач екологічного контролю їх стану. Вдосконалено метод мультиспектрального контролю токсичності з вико-

ристанням біоіндикації по фітопланктону, який, на відміну від відомих, використовує опосередковане вимірювання параметрів водних середовищ за допомогою регресійних рівнянь, що пов'язують ці параметри з результатами мультиспектральних вимірювань, що дає змогу підвищити достовірність контролю інтегральних параметрів забруднення водних середовищ. Вдосконалено метод мультиспектрального вимірювального контролю забруднення водних об'єктів за допомогою ряски малої, який, на відміну від відомих, визначає порівняні розміри зон водного середовища, які відповідають рослинам ряски без морфологічних змін, із морфологічними змінами і чистої поверхні води, за допомогою аналізу мультиспектральних зображень із подальшим розрахунком індексів токсичності, що дає змогу підвищити достовірність екоотоксикологічного контролю водних середовищ.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримане значення достовірності контролю підтверджує можливість використання розроблених засобів контролю токсичності у спеціалізованих лабораторіях екологічних інспекцій та промислових об'єктів після відповідної метрологічної атестації та включення у Державний реєстр засобів вимірювальної техніки.

Література

1. Крайнюков О.М. Особливості системи нормування антропогенного забруднення поверхневих вод в Україні та країнах ЄС. Молодий вчений. 2016. № 3 (30). С. 300–303.
2. Балтиев Ю.С., Усов Г.П. Методические указания по интегральной оценке качества окружающей среды (экологическая разведка местности). Москва: Военное издательство, 2005. 119 с.
3. Крайнюков О.М., Тімченко В. Д. Удосконалення комплексної оцінки екологічного стану та якості води водних об'єктів. Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія». 2016. Вип. 14. С. 9–14.
4. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: Вид. офіційне. Київ: Твій формат, 2006. 240 с.
5. Спосіб біологічної оцінки токсичності води та пристрій для біологічної оцінки токсичності води: пат. 8530 Україна: МПК6 G01N 33/18. № 3470469/SU; заявл. 14.07.1982; опубл. 30.09.1996, Бюл. № 3. 8 с.
6. Колупаев Б. И., Андреев А. А., Самойленко К. К. Оптический метод регистрации сердечного ритма у дафний. Гидробиологический журнал. 1977. Вып. 3, т. X10. С. 119–120.
7. Лазерно-доплерівський пристрій для оцінки токсичності та біологічної активності хімічних речовин: пат. 45481 Україна: МПК6 G01N 33/48, G01P 3/36. №99084597; заявл. 10.08.1999; опубл. 15.04.2002, Бюл. № 4. 16 с.
8. Спосіб визначення токсичності речовин у водних розчинах: пат. 24287 Україна: МПК6 G01N 33/18, C12Q 1/00. №u200701375; заявл. 09.02.2007; опубл. 25.06.2007, Бюл. № 9. 4 с.
9. Спосіб визначення екологічного стану водойм: пат. 89288 Україна: МПК6 G01N 33/18. №a200806287; заявл. 13.05.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. 3 с.
10. Трусевич В.В., Гайский П.В., Кузьмин К.А. Автоматизированный биомониторинг водной среды с использованием реакций двустворчатых моллюсков. Морской гидрофизический журнал. 2010. № 3. С. 75–83.
11. Пристрій для оцінки токсичності стічних вод: пат. 8529 Україна: МПК6 A01K 61/00 G01N 33/18. №3251904/SU; заявл. 19.02.1981; опубл. 30.09.1996, Бюл. № 3. 6 с.
12. Спосіб визначення впливу токсичності стічних вод на водні солоні середовища: пат. 76248 Україна: МПК6 C02F 3/00 G01N 33/18. № 20040604487; заявл. 09.06.2004; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7. 6 с.
13. Гейны С., Сытник К. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды. Киев: Наукова думка, 1993. 434 с.
14. Петрук В.Г., Кватернюк С.М., Слободянюк А.О., Безусяк Я.І. Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2015. № 1(29). С. 145–149.
15. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю забруднення водних об'єктів за допомогою ряски малої (*Lemna minor* L.): пат. 117336 Україна: МПК6 G01N 21/25, G01N 33/18. №u201613426; заявл. 27.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 6 с.
16. Кватернюк С.М. Математичне моделювання переносу випромінювання у багатошарових неоднорідних біологічних середовищах для задач мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2016. № 2(32). С. 57–63.