

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Кваторнюка Сергія Михайловича**  
**«Розвиток наукових основ мультиспектральних методів та технічних**  
**засобів контролю екологічного стану водних об'єктів»,**  
**подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**  
**за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека**

**Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Однією з найбільш гострих екологічних проблем сучасності є необхідність забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів. Однак теоретичні та практичні аспекти автоматизованого контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів розвинуті недостатньо. Відомі методи і засоби контролю екологічного стану водних об'єктів не забезпечують високу достовірність, що суттєво ускладнює прийняття науково обґрунтованих рішень у системі управління екологічною безпекою водних об'єктів. Отже, для підвищення достовірності контролю екологічного стану водних об'єктів виникає необхідність вдосконалення методів та розроблення технічних засобів контролю, які б дозволили більш точно вимірювати параметри забруднення водних середовищ та більш достовірно оцінювати екологічний стан водних об'єктів. Найбільш перспективним напрямком модернізації методів та засобів екологічного контролю є мультиспектральні методи, що зводиться до отримання зображень приповерхневого шару водних середовищ у декількох спектральних діапазонах та їх оброблення з метою визначення показників забруднення водних середовищ та подальшого оцінювання екологічного стану водних об'єктів.

Тому необхідність підвищення ефективності екологічного контролю і управління екологічною безпекою водних об'єктів шляхом розвитку наукових основ мультиспектральних методів та розроблених технічних засобів їх застосування є актуальною науково-прикладною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційні дослідження проводились відповідно до “Концепції національної екологічної політики України на період до 2020 року” та

«Основним засадам (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2020 року» під час виконання шести держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт Вінницького національного технічного університету за період з 2011 по 2018 р. (державні реєстраційні номери 0118U000208, 0116U004706, 0114U003459, 0114U003739С, 0111U001107, 0114U004573), у яких здобувач був відповідальним виконавцем.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, базуються на значному об'ємі теоретичних та експериментальних досліджень, є логічно обґрунтованими і підтверджуються результатами експериментів та математичного моделювання. Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю постановленої задачі, точністю використаних приладів та задовільною збіжністю математичних моделей з результатами експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розвитку наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю параметрів забруднення водних середовищ, які у сукупності забезпечують комплексне розв'язання завдань ефективного контролю та управління екологічною безпекою водних об'єктів.

Новизна даної дисертаційної роботи полягає в тому, що:

*у перше:*

– розроблено метод мультиспектрального контролю екотоксичності поверхневих вод з використанням опосередкованого вимірювання концентрації частинок мікроводоростей з обробкою результатів на основі застосування нейромережі та нейро-нечіткої мережі, що дозволило підвищити достовірність контролю;

– запропоновано метод мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод, сутність якого полягає у визначенні відносних розмірів сегментів поверхні водного середовища з вищими водними рослинами, які мають морфологічні зміни за результатами аналізу мультиспектральних зображень, отриманих широкосмуговою цифровою камерою при освітленні поверхні водного середовища джерелами випромінювання на характеристичних довжинах хвиль;

– встановлено за результатами моделювання процесу переносу випромінювання у приповерхневому шарі водного середовища з фітопланктоном із застосуванням запропонованої удосконаленої моделі відносний внесок окремих шарів у загальну спектральну характеристику коефіцієнту дифузного відбиття на його поверхні, що дозволило оцінити глибину водного середовища, на якій здійснюється мультиспектральний контроль параметрів екологічно небезпечного забруднення;

*удосконалено:*

– метод оцінювання екологічного стану водних об'єктів, сутність якого передбачає застосування мультиспектрального визначення видового складу фітопланктону з розрахунком індексів біорізноманіття;

– метод оцінювання екологічного стану водних об'єктів, що полягає у опосередкованому мультиспектральному вимірюванні біомаси та співвідношення пігментних параметрів у приповерхневому шарі водних середовищ з використанням запропонованих регресійних рівнянь;

*набуло подальшого розвитку:*

– математична модель процесу поширення випромінювання у водних середовищах з вищими водними рослинами, яка враховує ефект локалізованого поглинання випромінювання на їх спектральні характеристики, що дозволило науково обґрунтувати доцільність введення відповідних поправочних коефіцієнтів;

– метод мультиспектрального контролю інтегральних параметрів забруднення стічних вод з використанням вищих водних рослин у очисному комплексі, що полягає у оцінюванні стану вищих водних рослин у біореакторі на основі аналізу їх мультиспектральних зображень із застосуванням запропонованої експертної системи на базі нечіткої логіки або нейромережі.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у розробленні технічних засобів мультиспектрального контролю екологічного стану водних об'єктів для прикладних задач екологічного моніторингу на основі вдосконалених методів мультиспектральних вимірювань. Зокрема, було обґрунтовано схемні рішення, розроблено та виготовлено дослідні зразки технічних засобів мультиспектрального екологічного контролю; отримано регресійні рівняння для опосередкованого вимірювання параметрів водних середовищ;

обґрунтовано оптимальну кількість спектральних каналів та їх параметри для технічних засобів мультиспектрального контролю, що дозволяє забезпечити необхідну точність вимірювань; розроблено програмне забезпечення засобів екологічного контролю; розроблено науково-методичні рекомендації щодо реалізації запропонованих наукових основ використання мультиспектральних методів та технічних засобів екологічного контролю у системі управління екологічно безпечним станом водних об'єктів. Практична реалізація основних результатів досліджень дозволила впровадити розроблені методи та засоби екологічного контролю, їх програмне забезпечення та методики застосування для оцінювання комплексного впливу забруднюючих речовин на водні об'єкти у Вінницькому регіональному управлінні водних ресурсів (акт впровадження від 28.12.2017 р.), Олевській об'єднаній територіальній громаді (акт впровадження від 5.10.2017 р.) та ПП «Інтер-Еко» (акт впровадження від 25.01.2018 р.). Також результати дисертаційної роботи впроваджені у навчально-методичному процесі Вінницького національного технічного університету при викладанні дисциплін “Методи вимірювань параметрів в екології”, “Прилади та методи контролю параметрів навколишнього середовища”, “Аналіз якості навколишнього середовища” (акт впровадження від 3.09.2018 р.).

**Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.**

Основні положення дисертації опубліковані в 93 наукових працях, з них: 1 монографія, 3 розділи у монографіях, 28 статей у наукових фахових виданнях України, 12 публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 9 входить до науково-метричних баз Scopus та Web of Science), 6 патентів України на корисну модель, 42 тези на міжнародних конференціях. Основні положення дисертації повністю викладені в опублікованих роботах. Апробація результатів роботи здійснювалась на 23 наукових конференціях.

**Оцінка ідентичності змісту автореферату та основних положень дисертації.**

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і повністю відображає основні її науково-практичні результати, що отримані здобувачем.

## **Структура і зміст роботи.**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 564 найменувань та 6 додатків. Робота містить 103 рисунки і 46 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 464 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано наукову проблему, ідею, мету та задачі дисертаційної роботи, а також пункти наукової новизни та практичного значення отриманих результатів. Наведено інформацію про апробацію результатів досліджень і публікації, що висвітлюють основні положення дисертаційної роботи.

У **першому розділі** здійснено аналіз та узагальнення світового досвіду з контролю параметрів забруднення водних середовищ і оцінювання екологічного стану водних об'єктів, який показав, що контроль інтегральних показників забруднення водних середовищ з урахування синергетичної взаємодії забруднюючих речовин можливо здійснювати за допомогою біотестування та біоіндикації, що також узгоджується з вимогами Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЄС та «Порядку здійснення державного моніторингу вод» (затвердженого постановою КМУ 19.09.2018 р.). Однак відомі методи і засоби контролю екологічного стану водних об'єктів не забезпечують високу достовірність, що суттєво ускладнює прийняття науково обґрунтованих рішень у системі управління екологічною безпекою водних об'єктів. Тому для забезпечення ефективності екологічного контролю комплексних параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів встановлено необхідність вдосконалення мультиспектральних методи та технічних засобів контролю.

У **другому розділі** вдосконалено та здійснено аналіз математичних моделей водних середовищ для прикладних задач контролю параметрів їх забруднення на основі мультиспектральних зображень. Зокрема, вдосконалено математичні моделі спектральних характеристик водних середовищ при зміні біомаси фітопланктону та співвідношення між пігментами. Здійснено моделювання процесу переносу випромінювання у приповерхневих шарах водних середовищ на основі багат шарової структури та розраховано внесок кожного з шарів водного середовища у

загальний коефіцієнт дифузного відбиття на його поверхні, що дозволило оцінити на якій глибині вплив на спектральні характеристики стане меншим похибки вимірювання. Досліджено спектральні характеристики у водних середовищах з макрофітами та оцінено вплив на них ефекту локалізованого поглинання випромінювання.

У **третьому розділі** розроблено методи і засоби мультиспектрального контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів. Зокрема, запропоновано метод мультиспектрального контролю екотоксичності поверхневих вод, з використанням біотестування по мікрводоростях на основі опосередкованого вимірювання концентрацій частинок мікрводоростей із застосуванням нейромережі та нейро-нечіткої мережі для обробки результатів вимірювань. Вдосконалено метод та розроблено засіб мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод, що полягає у визначенні відносних розмірів сегментів поверхні водного середовища з макрофітами (ряска мала (*Lemna minor* L.)), які мають морфологічні зміни за результатами аналізу мультиспектральних зображень. Вдосконалено метод оцінювання екологічного стану водних об'єктів на основі мультиспектрального аналізу фітопланктону з розрахунком індексів біорізноманіття. Вдосконалено метод та розроблено засіб мультиспектрального вимірювання параметрів забруднення водних середовищ, який використовує опосередковане вимірювання параметрів забруднення водних середовищ за допомогою запропонованих регресійних рівнянь. Набув подальшого розвитку метод мультиспектрального контролю інтегральних параметрів забруднення стічних вод у очисному комплексі з використанням вищих водних рослин.

У **четвертому розділі** розроблено структурні схеми засобів мультиспектрального екологічного контролю та здійснено аналіз їх метрологічних характеристик. Розв'язано задачу оптимального вибору параметрів спектральних вимірювальних каналів з використанням множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних у програмі STATISTICA 6.1. Вибір параметрів визначається необхідною точністю опосередкованого вимірювання параметрів забруднення водних середовищ, що забезпечує необхідну достовірність екологічного контролю. Обґрунтовано схемні рішення та розроблено дослідні зразки технічних

засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів.

У **п'ятому розділі** розроблено програмне забезпечення Multispectral devices 1.029 для технічних засобів мультиспектрального контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів, що здійснює управління засобами контролю, фільтрацію та сегментацію мультиспектральних зображень, розрахунок параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів з використанням регресійних рівнянь, нейромережі та нейро-нечіткої мережі. При цьому, отримано достовірність контролю з використанням нейромережі 0,962, що достатньо для використання розробленого засобу контролю у спеціалізованих природоохоронних лабораторіях. При використанні нейро-нечіткої мережі ANFIS отримано похибку опосередкованого вимірювання концентрації частинок фітопланктону 3,7 %.

У **шостому розділі** розроблено науково-методичні рекомендації щодо реалізації запропонованих наукових основ використання мультиспектральних методів та технічних засобів, які враховують вплив їх характеристик і параметрів на ефективність процесу контролю забрудненості водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів, в системі управління їх екологічно безпечного стану. Дослідні зразки засобів мультиспектрального екологічного контролю використано для оцінювання комплексного впливу небезпечних компонентів побутових та промислових відходів, зокрема, пестицидних препаратів, косметичних та миючих засобів, шламу гальванічного виробництва тощо на екологічний стан водних об'єктів з використанням біотестування. Крім того, здійснено експериментальні дослідження екологічного стану водних об'єктів за допомогою дистанційних засобів мультиспектрального контролю на базі квадрокоптера з використанням біоіндикації за характеристиками угруповань макрофітів на прикладі р. Південний Буг та її притоків, а також на водних об'єктах підприємства «Енергогарант» ТОВ.

**Висновки** містять основні результати дисертаційного дослідження, достатньо логічно відображають хід розв'язку поставлених задач та достатньо повно характеризують науково-практичні досягнення дисертанта.

**Оформлення дисертації** за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим МОН України, наказ № 40 від 12 листопада 2017 року. Мова і стиль викладання дисертації і автореферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, визначені метою досліджень.

**Загальна оцінка роботи.** Дисертація та автореферат написані грамотно, послідовно, коректно та мають завершену логічну структуру. Поставлену автором мету досягнуто, сформульовані задачі вирішено, а висновки повністю відображають основний зміст роботи.

#### **Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі**

Разом з тим по дисертаційній роботі слід зробити наступні зауваження:

1. У розділі 2. не зрозуміло теоретичне обґрунтування аналізу синергетичної дії хімічних сполук при оцінюванні комплексного впливу забруднюючих речовин на екологічний стан водних об'єктів мультиспектральними методами.

2. Для обробки результатів моніторингу в розділі 5 використовуються нейромережі та нейро-нечіткої мережі . В чому полягає їх відмінність?

3. Математична модель водного середовища вимагає додатково пояснення параметрів та граничних умов роботи.

4. Відомо, що обґрунтування оптимальної кількості спектральних каналів повинно враховувати в першу чергу спектральні характеристики водних середовищ, а не технічні можливості існуючих мультиспектральних камер.

5. Оскільки під час обробці результатів мультиспектральних досліджень за допомогою нейромереж потрібно обробляти великий об'єм інформації, то доцільніше здійснювати це, наприклад, за допомогою хмарних технологій.

6. Для забезпечення можливості публічного доступу до результатів екологічного контролю водних об'єктів мультиспектральними методами з квадрокоптерів доцільно передавати після обробки у режимі реального часу на відповідні сайти суб'єктів державного моніторингу водних об'єктів.



Приведені вище зауваження не впливають на обґрунтованість наукових положень і висновків дисертації та не знижують наукової новизни і практичного значення одержаних результатів.

### **Загальний висновок по дисертаційній роботі.**

Дисертація Кватернюка Сергій Михайловича «Розвиток наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів» повністю відповідає паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека.

У цілому, дисертація Кватернюка С. М. «Розвиток наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів», є завершеною науковою працею, виконана на високому науковому рівні, містить коректно і повно обґрунтовані теоретичні та практичні розробки. У роботі вирішено наукову проблему розвитку наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів, які враховують вплив їх характеристик на ефективність процесу контролю забрудненості водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів, що є підґрунтям для ефективного забезпечення їх екологічної безпеки, зокрема, у підрозділах Держводагентства, ДСНС та Держекоінспекції.

У цілому, робота Кватернюка С.М. виконана відповідно до п.п. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а здобувач Кватернюк Сергій Михайлович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека.

Офіційний опонент,  
провідний науковий співробітник  
Інституту ядерних досліджень НАН України,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

С.І. Азаров

Підпис Азарова С.І. засвідчую  
Вчений секретар ІЯД НАН України



Н. Л. Дорошко