МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ
ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

КВАТЕРНЮК СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 504.064.3

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Петрук Василь Григорович,
Вінницький національний технічний університет, директор Інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля, Заслужений природоохоронець України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрушка Ігор Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
Ващенко Володимир Миколайович,
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, професор кафедри екологічного моніторингу, геоінформаційних та аерокосмічних технологій

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Азаров Сергій Іванович,
Інститут ядерних досліджень НАН України, провідний науковий співробітник відділу дослідницького ядерного реактора

Захист відбудеться "28" березня 2019 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 в Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2 та на сайті www.dea.edu.ua.

Автореферат розісланий "27" лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 _____ Т.Г. Іващенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При гармонізації природоохоронної системи України із законодавством ЄС у зв'язку із зобов'язаннями України та відповідно до міжурядових угод необхідно удосконалювати систему контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів. З метою забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів необхідно створення системи контролю параметрів забруднення, що дозволить оцінювати екологічний стан водних об'єктів, ефективність роботи очисних споруд, екотоксичність хімічних речовин, ефективність природоохоронних заходів на території промислових об'єктів, комплексний вплив небезпечних компонентів відходів на водні екосистеми тощо.

При цьому перспективним напрямком вдосконалення засобів екологічного контролю комплексного антропогенного забруднення водних об'єктів є оптичні методи контролю, зокрема, мультиспектральний метод. Загалом, мультиспектральний екологічний вимірювальний контроль параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів займає важливе місце при вирішенні різних прикладних задач екологічного моніторингу. Вимірювальний контроль параметрів забруднення приповерхневого шару водних середовищ та вмісту у ньому певних хімічних сполук може здійснюватись на основі обробки мультиспектральних зображень об'єкта отриманих ПЗЗ камерою на характеристичних довжинах хвиль. Концентрацію певних речовин у приповерхневому шарі об'єкта контролю можна аналізувати, порівнюючи отриманий масив мультиспектральних зображень з результатами вимірювань для модельних середовищ з відомими концентраціями пігментів, які отримані при певних визначених умовах проведення експерименту.

Значний вклад у розробку оптичних методів і засобів контролю параметрів неоднорідних середовищ внесли роботи Ван де Хюлста Г., Борена К., Хафмена Д., Розенберга Г.В., Рвачова В. П., Шифріна К. С., Іванова А. П., Пришивалко А. П., Петрука В. Г., Ващенка В.М., Зорі А. А., Кожем'яко В. П., Сахновського М. Ю., Лопатіна В.Н., Мальцева В.П. та ряду інших відомих науковців. Крім того, з точки зору екологічної безпеки водних об'єктів значний вклад внесли такі вчені: Романенко В. Д., Гончарук В.В., Клименко М.О., Погребенник В. Д., Азаров С. І., Крайнюков О. М., Пилипенко Ю. В., Гомеля М. Д., Петрушка І. М., Барінова С.С., Бакаєва О.М., Афанасьєв С.О., Арапіс Г. та ін.

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів шляхом підвищення достовірності контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів відповідно до задач екологічного моніторингу з урахуванням їх оптико-фізичних характеристик за рахунок вдосконалення мультиспектральних методів та розроблення відповідних апаратно-програмних засобів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає "Концепції національної екологічної політики України на період до 2020 року", затвердженої розпорядженням Кабінету

Міністрів Україні від 17.10.2007 р. № 880-р. та «Основним засадам (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2020 року», затвердженим Законом України № 2818-VI від 21.12.2010 р., і виконувалась у рамках проведення держбюджетних науково-дослідних робіт Вінницького національного технічного університету "Розроблення заходів екологічної безпеки у сфері поводження з небезпечними відходами та дослідження їх впливу на водні об'єкти із використанням біосенсорних технологій" у 2018 р. (номер державної реєстрації 0118U000208); "Розробка методів та засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ" у 2016–2017 рр. (номер державної реєстрації 0116U004706); "Розробка методів та засобів вимірювального контролю оптичних параметрів неоднорідних середовищ на основі мультиспектральних зображень" у 2014–2015 рр. (номер державної реєстрації 0114U003459); "Розроблення оптичних засобів та вдосконалення методів контролю концентрації фітопланктону у водних об'єктах" комплексної держбюджетної НДР "Розроблення вимірювальних засобів та нових методів оперативного контролю інтегральних параметрів забруднення водних середовищ" у 2014-2015 рр. (номер державної реєстрації 0114U003739С); "Розроблення спектрополяриметричних методів та засобів локації і контролю для дослідження полідисперсних середовищ в екологічному моніторингу" у 2011-2013 рр. (номер державної реєстрації 0111U001107); госпдоговірної науково-дослідної роботи "Еколого-економічне обґрунтування та розроблення природоохоронних заходів для водних об'єктів та прибережної території підприємства «Енергогарант» ТОВ" у 2014 р. (номер державної реєстрації 0114U004573), у яких автор був відповідальним виконавцем.

Ідея роботи полягає у підвищенні ефективності екологічного контролю і управління екологічною безпекою водних об'єктів шляхом розвитку наукових основ мультиспектральних методів та розроблених технічних засобів їх застосування.

Метою роботи є розвиток наукових основ застосування 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.

Для досягнення вказаної мети було визначено та поставлено до розв'язку такі **задачі досліджень**:

– здійснити аналіз існуючих методів і засобів, які застосовують в системі екологічного моніторингу поверхневих вод, та виявити шляхи підвищення ефективності екологічного контролю і управління екологічною безпекою водних об'єктів;

– обґрунтувати методологію і методи проведення теоретичних та експериментальних досліджень;

– удосконалити математичні моделі водних середовищ з фітопланктоном та вищими водними рослинами для вирішення прямої задачі формування їх мультиспектральних зображень технічними засобами мультиспектрального контролю;

– розв’язати обернену задачу визначення параметрів забруднення водних середовищ і екологічного стану водних об’єктів за їх мультиспектральними зображеннями і обґрунтувати доцільність її застосування в удосконалених методах мультиспектрального екологічного контролю поверхневих вод;

– науково обґрунтувати оптимальну кількість спектральних каналів та їх параметри у технічних засобах мультиспектрального екологічного контролю забрудненості водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів за умови забезпечення заданих метрологічних параметрів;

– науково обґрунтувати схемні рішення та виготовити дослідні зразки удосконалених технічних засобів мультиспектрального екологічного контролю забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів, а також визначити їх метрологічні характеристики;

– розробити програмне забезпечення технічних засобів мультиспектрального контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів;

– розробити 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 екологічною безпекою.

Об’єкт дослідження – процес контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів.

Предмет дослідження – вплив характеристик та параметрів мультиспектральних методів та технічних засобів на ефективність процесу контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний системний підхід, який включав теоретичні методи аналізу та узагальнення світового досвіду з контролю параметрів забруднення водних середовищ і оцінювання екологічного стану водних об’єктів; методи теорії перенесення випромінювання у багатошарових світлорозсіювальних водних середовищах; методи математичної статистики для обробки параметрів водних середовищ, оптимального вибору спектральних каналів технічних засобів мультиспектрального контролю за допомогою покрокової множинної регресії у програмі STATISTICA 6.1; методи математичного моделювання динаміки популяцій фітопланктону на основі систем рекурентних рівнянь з використанням програми Mathcad 13. Для розв’язання оберненої задачі визначення параметрів водних середовищ використано нейромережі та нейро-нечіткі мережі за допомогою програм STATISTACA 6.1 та MATLAB R2008a. Результати мультиспектрального контролю водних об’єктів порівнювались із результатами експериментального вимірювання параметрів забруднення водних середовищ, отриманих традиційними фізико-хімічними методами з використанням метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання. Методи теорії вимірювань використані для оцінювання

достовірності контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів на основі вдосконалених методів мультиспектрального екологічного контролю та розроблених технічних засобів. Методи аналізу мультиспектральних зображень, їх сегментації та фільтрації використані для обробки одержаних експериментальних результатів з використанням розробленого програмного забезпечення Multispectral devices 1.029.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку наукових основ 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. При цьому:

уперше:

– науково обґрунтовано та розроблено метод мультиспектрального контролю екотоксичності, як інтегрального показника забруднення поверхневих вод з використанням опосередкованого вимірювання концентрації частинок мікроводоростей з обробленням результатів із застосуванням нейромережі та нейро-нечіткої мережі, що на відміну від відомих, дозволило підвищити достовірність контролю до значення 0,962;

– науково обґрунтовано та запропоновано метод мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод водних об’єктів, сутність якого, на відміну від відомих, 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, що дозволило підвищити достовірність контролю забруднення поверхневих вод та отримувати результати вимірювань з похибкою до 0,48 %;

– за результатами моделювання процесу світлорозсіювання у шарах водного середовища з фітопланктоном із застосуванням запропонованої удосконаленої моделі виявлено відносний внесок окремих шарів у загальний коефіцієнт дифузного відбиття, що дозволяє розраховувати глибину водного об’єкта, на якій такий внесок матиме значення в межах похибки вимірювань;

удосконалено:

– метод оцінювання екологічного стану водних об’єктів, сутність якого, на відміну від відомих, передбачає застосування мультиспектрального визначення видового складу фітопланктону з розрахунком індексів біорізноманіття;

– метод оцінювання екологічного стану водних об’єктів, сутність якого, на відміну від відомих, полягає у опосередкованому мультиспектральному вимірюванні біомаси та співвідношення пігментних параметрів у приповерхневому шарі водних об’єктів з використанням запропонованих регресійних рівнянь, що дозволило забезпечити достовірність екологічного контролю 0,974;

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 обґрунтувати доцільність введення відповідних поправочних коефіцієнтів, які враховують форму та розміри розсіювачів;

– застосування методу мультиспектрального контролю інтегральних параметрів забруднення стічних вод з використанням вищих водних рослин у очисному комплексі, сутність якого, на відміну від відомих, полягає у оцінюванні стану вищих водних рослин у біореакторі на основі аналізу їх мультиспектральних зображень з визначенням концентрацій їх основних пігментів із застосуванням запропонованої експертної системи на базі нечіткої логіки або нейромережі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні технічних засобів мультиспектрального контролю екологічного стану водних об’єктів для прикладних задач екологічного моніторингу на основі вдосконалених методів мультиспектральних вимірювань. До результатів, одержаних у дисертаційній роботі, що мають технічну новизну та практичну цінність, належать:

1. Науково обґрунтовано схемні рішення та розроблено технічні засоби мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів на основі опосередкованого вимірювань, зокрема, біомаси фітопланктону та вищих водних рослин, а також співвідношень між їх основними пігментами.

2. Науково обґрунтовано оптимальну кількість спектральних каналів та їх параметри для технічних засобів мультиспектрального контролю за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних, що дозволяє забезпечити необхідну точність опосередкованого вимірювання та достатню достовірність контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів.

3. У результаті розв’язку оберненої оптичної задачі визначення біомаси і співвідношень між пігментними параметрами у водних середовищах за їх мультиспектральними зображеннями отримано регресійні рівняння, що дозволяють опосередковано вимірювати ці параметри у технічних засобах екологічного контролю.

4. Для розроблених дослідних зразків технічних засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ оцінено достовірність контролю, що визначається похибками у вимірювальних каналах, а також залежить від обраних робочих довжин хвиль спектральних каналів, їх діапазону та кількості каналів.

5. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення технічних засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів для впровадження у природоохоронних установах.

6. Розроблено науково-методичні рекомендації щодо реалізації запропонованих наукових основ використання мультиспектральних методів та технічних засобів екологічного контролю, які врахували вплив їх метрологічних характеристик та параметрів на ефективність процесу контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів у системі управління їх екологічною безпекою.

За безпосередньою участю автора розроблені і впроваджені окремі результати дисертаційної роботи:

1. У Вінницькому регіональному управлінні водних ресурсів впроваджено метод та засіб мультиспектрального контролю токсичності стічних вод; алгоритмічне і програмне забезпечення засобу мультиспектрального контролю токсичності; експериментальну методику контролю токсичності стічних вод за допомогою біоіндикації (акт впровадження від 28.12.2017 р.), що дозволило забезпечити екологічну безпеку скиду стічних вод.

2. У Олевській об'єднаній територіальній громаді впроваджено метод та засіб мультиспектрального екологічного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент твердих побутових відходів; алгоритмічне і програмне забезпечення засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент твердих побутових відходів; експериментальну методику мультиспектрального екологічного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент твердих побутових відходів (акт впровадження від 5.10.2017 р.), що дозволило підвищити ефективність екологічного контролю впливу на довкілля сміттєзвалищ та сміттєпереробних комплексів.

3. У ПП «Інтер-Еко» впроваджено методи та засоби мультиспектрального екологічного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент промислових відходів та оцінювання їх комплексного техногенного впливу на водні об'єкти; алгоритмічне і програмне забезпечення засобу мультиспектрального екологічного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент промислових відходів; експериментальну методику мультиспектрального екологічного вимірювального контролю токсичності небезпечних компонент промислових відходів (акт впровадження від 25.01.2018 р.), що дозволило оцінити їх комплексний техногенний вплив та оперативно оцінити токсичність небезпечних компонентів промислових відходів.

4. У навчально-методичному процесі Вінницького національного технічного університету, для студентів спеціальності 101 "Екологія", 183 "Технології захисту навколишнього середовища" при проведенні лабораторних та практичних робіт з дисциплін "Методи вимірювань параметрів в екології", "Прилади та методи контролю параметрів навколишнього середовища", "Аналіз якості навколишнього середовища" впроваджено метод та засоби мультиспектрального екологічного вимірювального контролю параметрів неоднорідних водних середовищ, алгоритмічно-програмне забезпечення для мультиспектрального контролю параметрів фітопланктону у водних

середовищах, експериментальні методики контролю інтегральних параметрів забруднення водних середовищ. (акт впровадження від 3.09.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У дисертації узагальнені результати досліджень за період з 2011 по 2018 роки, в яких автор брав безпосередню участь. Особисто дисертанту належить формулювання наукової проблеми, мети та основних задач досліджень, обґрунтування положень наукової новизни, встановлення практичної значимості результатів, формування загальних висновків. Автором проведений аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи; обґрунтовані методи дослідження; проаналізовано сучасні методи та засоби екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ; здійснено математичне моделювання водних середовищ для прикладних задач контролю їх параметрів забруднення на основі мультиспектральних зображень; розроблено та вдосконалено методи мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ; розраховано метрологічні параметри засобів контролю; розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення засобів мультиспектрального екологічного контролю, а також розроблені методики контролю параметрів забруднення водних об'єктів і досліджено роботу засобів мультиспектрального екологічного контролю у лабораторних умовах та безпосередньо на водних об'єктах.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, такий: розробив методи та засоби мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та проаналізував їх метрологічні параметри [22, 23, 40, 56, 60, 67, 73, 75, 77, 84, 87–90, 92]; здійснив аналіз сучасних оптичних засобів контролю та вдосконалив метод контролю приповерхневого шару [30, 31, 63, 69, 93]; вдосконалив математичні моделі спектральних характеристик водних середовищ для розв'язку прямої та оберненої задачі при мультиспектральних вимірюваннях їх параметрів [1, 29, 32, 37, 38, 41, 44, 48, 74, 86]; вдосконалив методи опрацювання мультиспектральних зображень, зокрема, їх сегментації, фільтрації та виділення порушеної ділянки поверхні з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, нейромережі та нейро-нечіткої мережі [27, 39, 43, 52, 78, 85]; на основі проведених екологічних досліджень водних об'єктів відібрав сполучні території, які покладені в основу розробленої схеми екологічної мережі [25]; виконав математичне моделювання динаміки популяцій фітопланктону в водних екосистемах, вдосконалив методи і засоби мультиспектрального контролю екологічного водних середовищ за параметрами фітопланктону, вдосконалив методику контролю параметрів забруднення та здійснив експериментальні дослідження у водних об'єктах [2, 4, 26, 34, 36, 42, 45, 47, 50, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 64–66, 68, 70, 72, 79–83]; вдосконалив методи та засоби мультиспектрального контролю екологічного стану водних об'єктів за характеристиками макрофітів, вдосконалив методики екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ за характеристиками макрофітів та

здійснив експериментальні дослідження [3, 28, 33, 35, 46, 49, 51, 55, 62, 71, 76, 91].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися та обговорювались на 23 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, з'їздах та конгресах, а саме: VII та VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка-ОДС»» (м. Вінниця, 2015 р., 2018 р.); XII та XVI Міжнародних науково-технічних конференціях "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ, 2013 р., 2017 р.,); XI Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 2012 р.); I, II, IV Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних (м. Вінниця, 2011 р., 2013 р., 2017 р.); IV, V та VI Міжнародній науково-практичній конференції «Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю» (м. Вінниця, 2013 р., 2015 р., 2017 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (м. Миколаїв, 2012 р.); II, III та V Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2012 р., 2014 р., 2018 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Наука. Молодь. Екологія.» в рамках I-го Всеукраїнського молодіжного з'їзду екологів з мі`жнародною участю (м. Житомир, 2014 р.); XXIII Всеукраїнській науковій конференції «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів» (м. Донецьк, 2013 р.); IX Всеукраїнській науково-практичній конференції «Екологічна безпека держави» (м. Київ, 2015 р.); XVI, XVII та XVIII Міжнародній конференції «International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM» (м. Албена, Болгарія, 2016 р., 2017 р., 2018 р.); Міжнародній конференції «New Trends in Ecological and Biological Research» (м. Пряшів, Словацька Республіка, 2015 р.); XVI Міжнародній конференції «International Conference on Control, Automation and Systems» (м. Кьонджу, Південна Корея, 2016 р.), а також на XL–XLVII науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 2011–2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 93 наукових роботи, в тому числі 1 монографія, 3 розділи у монографіях, 28 статей у наукових фахових виданнях України (з них 18 одноосібні, 20 статей входять до міжнародних науково-метричних баз), 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 доповідей на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів (які містять 103 рисунки і 46 таблиць), висновків, 6 додатків і списку використаних літературних джерел (564 бібліографічних посилання).

Загальний обсяг дисертації складає 464 сторінок, з яких основний зміст викладено на 330 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру й обсяг роботи тощо.

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів та засобів екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів. Здійснений аналіз методів комплексної оцінки техногенного забруднення природних водних об'єктів підтвердив, що контроль інтегральних показників забруднення вод, у відповідності до міжнародних зобов'язань України та необхідності гармонізації стратегії у галузі водної політики в Україні з Європейським законодавством повинен базуватись водній екотоксичності. При цьому комплексну інтегральну оцінку стану водної екосистеми, з урахуванням різних проявів взаємодії забруднювальних хімічних речовин, можна отримати за допомогою методу біотестування. Система оцінки детермінованого екологічного ризику небезпечних речовин використовує значення токсичності і концентрації небезпечних речовин у водних середовищах, а показником детермінованого ризику є співвідношення TER (Toxicity exposure ratio):

$$TER_{i,j} = \frac{LC_{50\ j}\left(NOEC_j\right)}{C_i}, \qquad (1)$$

де $TER_{i,j}$ – співвідношення для і-тої речовини при використанні j-того тест-об'єкта; $LC_{50\ j}$ – напівлетальна концентрація для j-того тест-об'єкта; $NOEC_j$– недіюча концентрація для j-того тест-об'єкта; C_i – концентрація і-тої речовини у водному середовищі.

Для подальших досліджень у якості тест-об'єктів обрано мікроводорості та вищі водні рослини, а тест-параметрами обрано концентрацію біомаси та співвідношення між пігментами.

Основні біологічні показники, які рекомендується використовувати для оцінювання екологічного стану водних об'єктів методами біоіндикації у Водній Рамковій Директиві 2000/60/ЕС, це склад, кількість та наявність чутливих таксонів для донних безхребетних, макрофітів, донних водоростей, риб та фітопланктону. Макрофіти та фітопланктон використовуються для оцінювання евтрофікації водних об'єктів. 19 вересня 2018 р. постановою Кабінету Міністрів України №758 затверджено «Порядок здійснення державного моніторингу вод». Складовими державного моніторингу масивів поверхневих вод є моніторинг біологічних, гідроморфологічних, хімічних та фізико-хімічних показників. Зокрема, у цьому документі вказано біологічні показники для фітопланктону та судинних рослин, які визначаються у ході діагностичного та операційного моніторингу.

Проведений аналіз існуючих методів контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів показав їх недосконаліть та неспроможність вирішення поставленої задачі, що зумовило необхідність вдосконалення методів мультиспектрального контролю.

На підставі вище викладеного встановлено необхідність забезпечення ефективності екологічного контролю комплексних параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів на основі удосконалення мультиспектральних методів та технічних засобів контролю.

Методологію розв’язання проблеми забезпечення ефективного контролю і управління екологічною безпекою водних об’єктів з використанням мультиспектральних методів та засобів наведено на рис. 1.

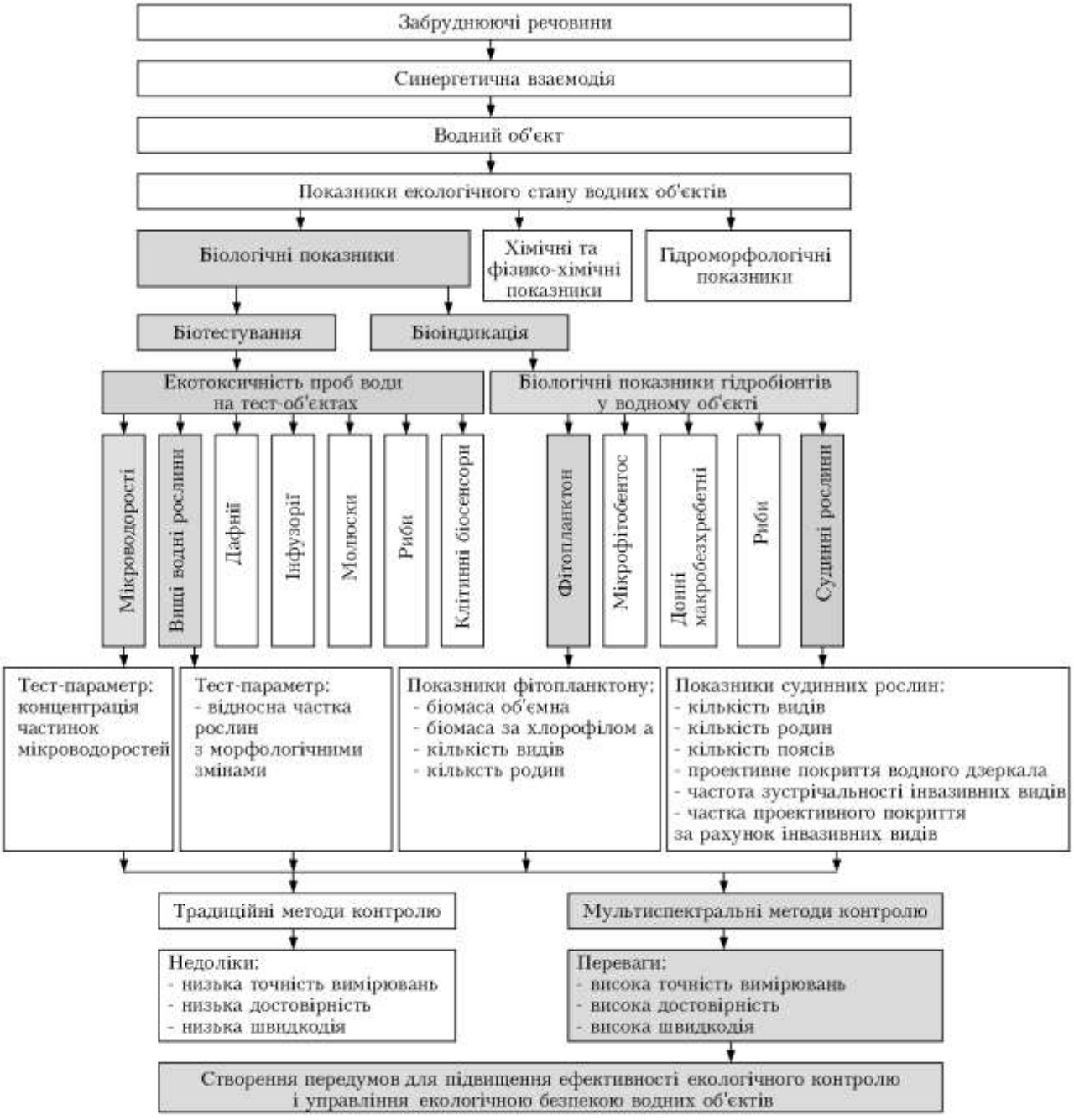


Рисунок 1 – Методологія забезпечення ефективного контролю і управління екологічною безпекою водних об’єктів з використанням мультиспектральних методів та засобів

У другому розділі вдосконалено та здійснено аналіз математичних моделей водних середовищ для прикладних задач контролю параметрів їх забруднення на основі мультиспектральних зображень. Вдосконалено математичні моделі спектральних характеристик водних середовищ при зміні біомаси фітопланктону та співвідношення між пігментами.

Метод мультиспектрального контролю полягає у аналізі цифрових зображень об'єкту, отриманих у відповідних спектральних діапазонах. При цьому координати у мультиспектральному просторі визначаються на основі спектральних характеристик джерел випромінювання $P_j(\lambda_i)$, чутливості камери у кожному спектральному каналі $\overline{m_j}(\lambda_i)$ та спектральної характеристики коефіцієнту дифузного відбиття об'єкта контролю $\rho(\lambda_i)$:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_1(\lambda_i)\overline{m_1}(\lambda_i)\rho(\lambda_i)\Delta\lambda, \\ M_2 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_2(\lambda_i)\overline{m_2}(\lambda_i)\rho(\lambda_i)\Delta\lambda \\ \ldots \\ M_n = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_n(\lambda_i)\overline{m_n}(\lambda_i)\rho(\lambda_i)\Delta\lambda. \end{cases} \quad (2)$$

Математична модель одного шару водного середовища з частинками фітопланктону пов'язує його біофізичні та структурні параметри і спектральні характеристики. На основі індикатрис розсіювання частинок фітопланктону $p(\theta,\lambda)$ розраховано спектральні характеристики фактору анізотропії для частинок різного діаметру:

$$g(\lambda) = \frac{\int_{4\pi} p(\theta,\lambda)\cos(\theta)d\omega}{\int_{4\pi} p(\theta,\lambda)d\omega}, \quad (3)$$

де $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$ – елементарний тілесний кут.

Фактор анізотропії $g(\theta,\lambda)$ дозволяє розрахувати ефективний показник розсіювання $\mu_s'(\lambda)$, ефективний показник послаблення (екстинкцією) $\mu_e'(\lambda)$, частку світла, розсіяного в передню півсферу $F_{\text{e}}(\lambda)$, ймовірність виживання фотона $\Lambda_e(\lambda)$. В свою чергу, це дозволяє розрахувати коефіцієнт дифузного відбиття $R_{\text{d}}(\lambda)$ та коефіцієнт направленого пропускання $T(\lambda)$, які вимірюються мультиспектральними методами в залежності від схеми реалізації засобу вимірювань. При цьому ефективний показник розсіювання залежить від фактору анізотропії $g(\lambda)$ таким чином:

$$\mu_s' = \mu_s(1-g(\lambda)). \quad (4)$$

Загальне послаблення оптичного випромінювання структури з врахуванням втрат за рахунок поглинання і розсіювання виражається ефективним показником послаблення (екстинкцією):

$$\mu'_e = \mu_a + \mu'_s, \tag{5}$$

де μ_a – показник поглинання середовища, μ'_s – ефективний показник розсіювання.

Втрати інтенсивності оптичного випромінювання внаслідок розсіювання залежать від форми і розмірів розсіюючих частинок. При цьому частина випромінювання розсіюється назад, проходить всі шари водного середовища і потрапляє на поверхню, а частина розсіюється у прямому напрямку і проходить вглиб середовища

$$I(z) = I_0 \exp(-\mu'_e z), \tag{6}$$

де μ'_e – ефективний показник ослаблення (екстинкція).

На основі аналізу і апроксимації індикатрис з великим ступенем витягнутості «вперед» використано вираз для частки світла, розсіяного в передню півсферу

$$F_{\text{e}}(\lambda) = 0.5 \int_0^{\pi/2} p(\theta, \lambda) \sin\theta d\theta \approx 1 - [1 - g(\lambda)]/3. \tag{7}$$

Оптична товщина знаходиться за виразом

$$\tau_e(\lambda) = \mu'_e d_e, \tag{8}$$

де d_e – геометрична товщина.

Ймовірність виживання фотона

$$\Lambda_e(\lambda) = \frac{\mu'_s(\lambda)}{\mu'_e(\lambda)}. \tag{9}$$

При малокутовому наближенні коефіцієнт дифузного відбиття при освітленні по нормалі до поверхні має вигляд:

$$R_{\text{d}}(\lambda) = \Lambda_{\text{e}}(\lambda) \frac{1 - F_{\text{e}}(\lambda)}{1 - F_{\text{e}}(\lambda)\Lambda_{\text{e}}(\lambda)} \int_0^1 \{1 - \exp[-\alpha(\lambda) d_{\text{e}} \frac{1+\nu}{\nu})]\} d\nu, \tag{10}$$

де $\alpha(\lambda) = \mu'_e(\lambda)\left(1 - \Lambda_{\text{e}}(\lambda) F_{\text{e}}(\lambda)\right)$ – показник послаблення в малокутовому наближенні, $\upsilon = \cos(\gamma), \gamma$ – кут розсіювання.

Коефіцієнт направленого пропускання

$$T(\lambda) = \exp[-\alpha(\lambda) d_{\text{e}}]. \tag{11}$$

Спектральні характеристики показників поглинання і розсіювання пігментів частинок, а також природного водного середовища без завислих частинок вводяться у математичну модель за довідниковими даними з використанням лінійної сплайн-апроксимації. Після проведення математичного моделювання отримуємо залежності спектральної характеристики коефіцієнту дифузного відбиття чи направленого пропускання від певних параметрів водних середовищ. Підставивши відомі значення параметрів у математичну модель суспензії частинок можна отримати залежності коефіцієнту дифузного

відбиття $R_d(\lambda)$ чи направленого пропускання $T(\lambda)$ суспензії, тобто розв'язати пряму оптичну задачу. При цьому з'являється можливість отримати регресійні рівняння, що пов'язують значення параметрів водного середовища та спектральні параметри на певних довжинах хвиль. Після проведення мультиспектральних вимірювань за допомогою відповідних технічних засобів опосередковано вимірюють необхідні параметри середовища з використанням цих регресійних рівнянь. На рис. 2 наведено графіки розрахованих спектральних характеристик для шару водного середовища при зміні біомаси фітопланктону (рис. 2, а), співвідношення між хлорофілом *a* та загальним хлорофілом (рис. 2, б) та співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом (рис. 2, в).

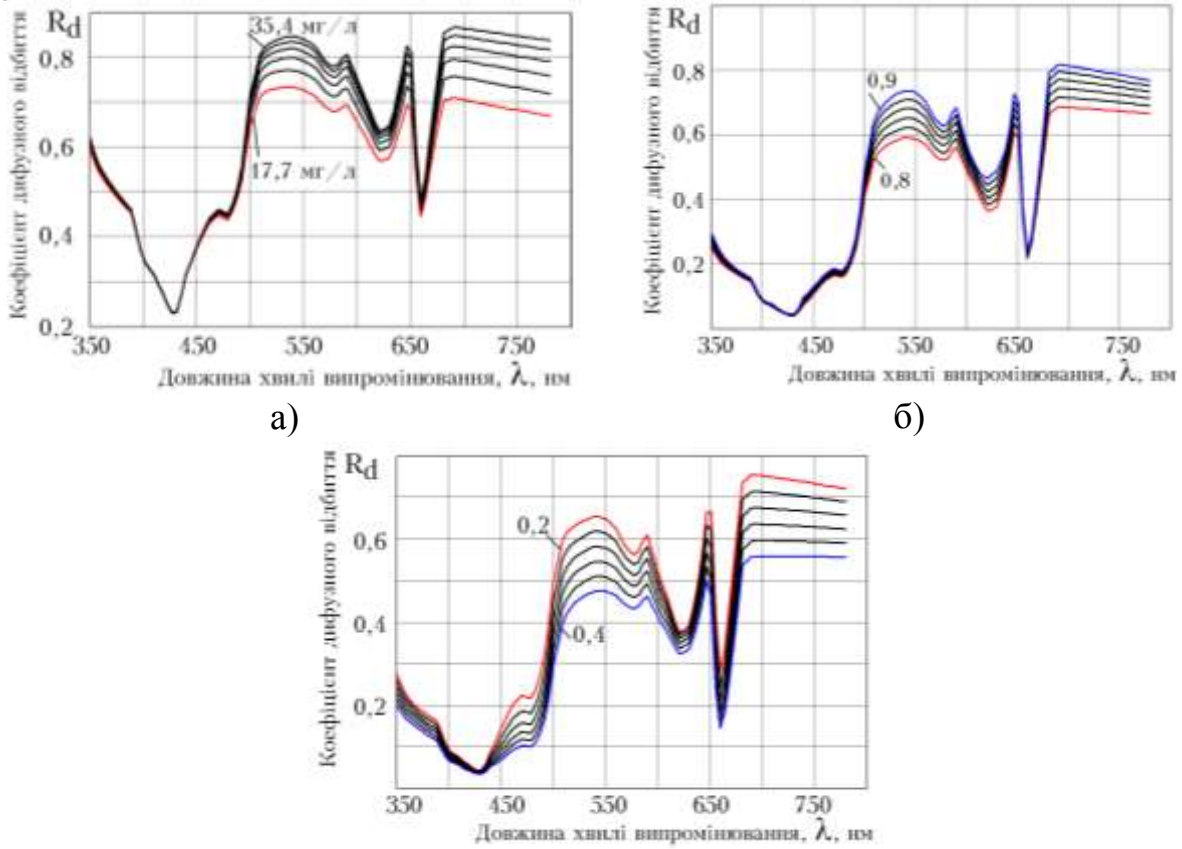


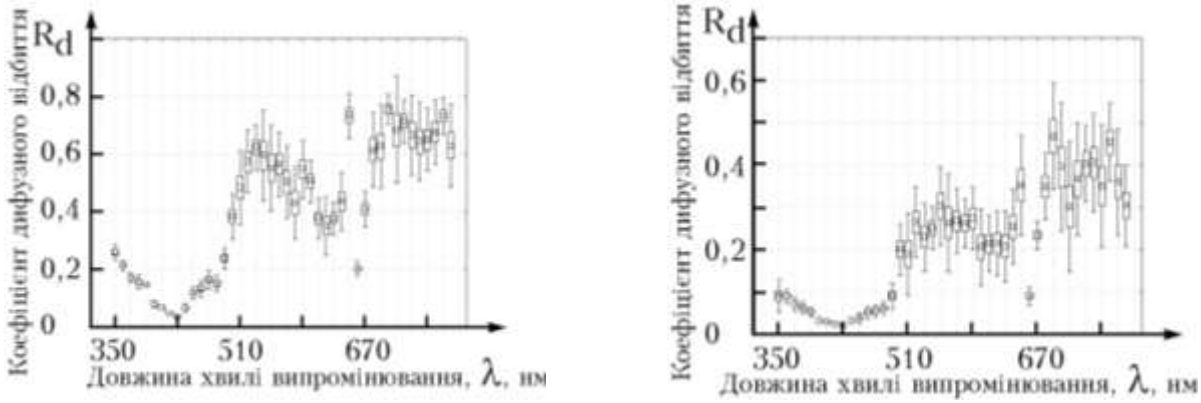
Рисунок 2 – Спектральні характеристики шару водного середовища

Здійснено математичне моделювання переносу випромінювання у приповерхневих шарах водних середовищ на основі багатошарової структури. Розраховано внесок для 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:

$$R_d = \sum_{i=1}^{n} (1 - R_{01})^2 \prod_{j=1}^{i} T_{l(j-1)}^2 T_{lj} R_{lj}, \qquad (12)$$

де R_{01} − складова коефіцієнту відбиття на межі повітря-водне середовище; T_l – коефіцієнт направленого пропускання шару природного водного середовища, R_l – коефіцієнт дифузного відбиття шару природного водного середовища.

Проведено статистичний аналіз впливу зміни біомаси та пігментних параметрів фітопланктону на спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водних середовищ та отримано діаграми розмаху на робочих довжинах хвиль спектральних каналів засобів мультиспектрального контролю. Розраховані спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні біомаси фітопланктону наведено на рис. 3.



а) б)

Рисунок 3 – Спектральні характеристики загального коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища при зміні біомаси фітопланктону від B_1 = 17,7 мг/л (а) до B_2 = 35,4 мг/л (б)

Досліджено спектральні характеристики у водних середовищах з вищими водними рослинами. При цьому досліджено вплив ефекту локалізованого поглинання випромінювання вищими водними рослинами на їх спектральні характеристики.

Загальна схема розв’язку прямої задачі формування мультиспектральних зображень поверхні водного середовища з частинками фітопланктону наведена на рис. 4. На основі цих даних розраховуємо оптичні характеристики водного середовища з урахуванням впливу усіх шарів. На основі отриманих спектральних характеристик водного середовища з урахуванням спектральних характеристик камери, фільтрів та джерела випромінювання отримуємо мультиспектральні параметри у кожному пікселі мультиспектрального зображення.

Загальна схема оцінювання достовірності мультиспектрального контролю параметрів водних середовищ отриманих після розв'язку оберненої оптичної задачі наведена на рис. 5. Для отримання тест-параметрів для водних середовищ з мультиспектральних зображень необхідно розв’язати обернену оптичну задачу. Це буде здійснено за допомогою множинної регресії, нейромережі та нейро-нечіткої мережі. Іншим варіантом реалізації мультиспектрального контролю є багатопараметричний контроль безпосередньо за результатами мультиспектральних вимірювань без використання регресійного рівняння.

Рисунок 4 – Загальна схема розв'язку прямої задачі формування мультиспектральних зображень водного середовища з фітопланктоном та вищими водними рослинами

Рисунок 5 – Схема оцінювання достовірності мультиспектрального контролю параметрів водних середовищ

У третьому розділі розроблено методи і засоби мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів.

Вдосконалено метод та розроблено засіб мультиспектрального вимірювання параметрів забруднення водних середовищ, який на відміну від відомих, використовує опосередковане вимірювання параметрів забруднення водних середовищ за допомогою регресійних рівнянь, що пов'язують ці параметри з результатами вимірювань яскравості у кожному пікселі зображень, отриманих на певних довжинах хвиль при використання у засобі вимірювального контролю ПЗЗ-камер, фільтрів та джерел випромінювання з відомими спектральними характеристиками. Для опосередкованого вимірювання параметра забруднення водного середовища f_x на основі мультиспектральних вимірювань у n спектральних каналах та використанні поліномів k-того порядку регресійне рівняння матиме такий вид:

$$f_x = a_0 + \sum_{i=1}^{n}\left(b_{1,i}M_i + b_{2,i}M_i^2 + b_{3,i}M_i^3 + ...b_{k,i}M_i^k\right). \qquad (13)$$

На рис. 6. представлено структурну схему засобу, що реалізує запропонований метод. Засіб містить кільцевий дифузний освітлювач 1, що слугує для освітлення зразку водного середовища, який позначено позицією 6. ПЗЗ-камера 2 оптично з'єднана з об'єктивом 3, який з'єднано з перестроюваним фільтром 4. Крім того, ПЗЗ-камера 2 підключена до блоку керування та обробки зображень 5.

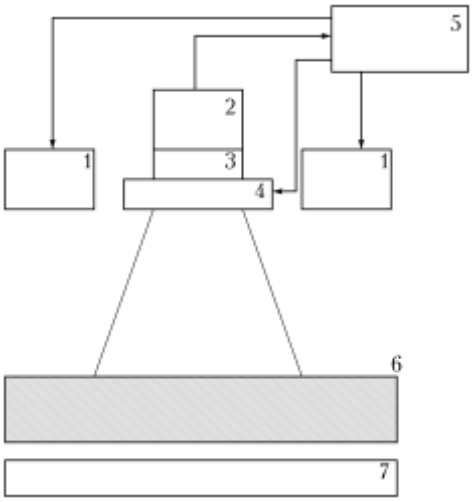


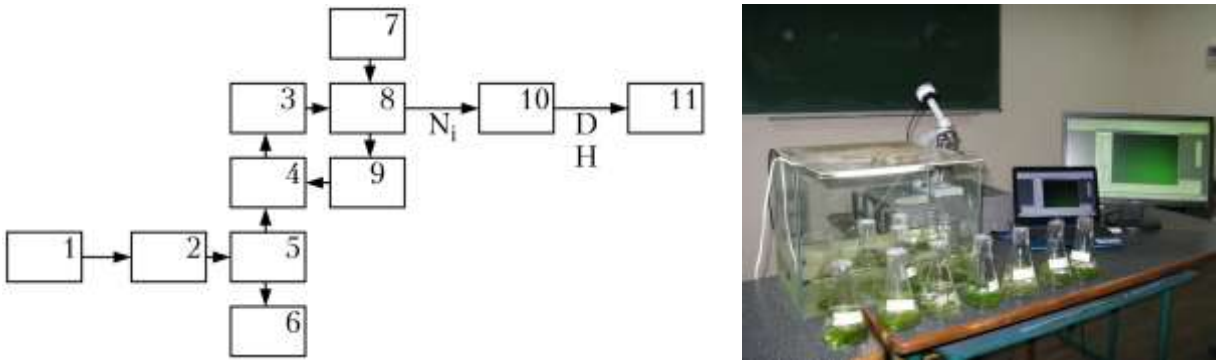
Рисунок 6 – Структурна схема засобу мультиспектрального вимірювання параметрів забруднення водних середовищ

За умови необхідності дослідження тонкого шару водного середовища, що містить розсіювальні частинки різної форми та розмірів, використовують додатковий дифузний відбивач 7. Модель тонкого шару водного середовища може використовуватись при дослідженні проб води з використанням біотестування в кюветі.

При екологічному моніторингу безпосередньо у водному об'єкті додатковий дифузний відбивач 7 не використовують.

Для мультиспектрального контролю параметрів багатошарових водних середовищ ПЗЗ-камера, об'єктив та перестроюваний фільтр пристрою можуть знаходитись в глибині водного середовища і фіксувати мультиспектральні зображення, що створюються оптичним випромінюванням у кожному з шарів. Модель багатошарового водного середовища є найбільш універсальною і може використовуватись для багатьох задач, зокрема екологічному моніторингу водних об'єктів з використанням біоіндикації по фітопланктону чи макрофітам.

Вдосконалено метод та розроблено засіб мультиспектрального контролю екологічного стану водних об’єктів за параметрами фітопланктону, який на відміну від відомих, використовує проточний мультиспектральний вимірювальний аналіз частинок фітопланктону, при якому порівнюють зображення частинок у проточній вимірювальній кюветі отримані на характеристичних довжинах хвиль пігментів фітопланктону за допомогою мікроскопу та CCD-камери з зображеннями з бази даних частинок фітопланктону певних видів у спеціалізованому процесорі, визначають абсолютну та відносну чисельність частинок фітопланктону кожного з видів, які присутні у пробі та розраховують індекси Сімпсона та Шеннона. На рис. 7, а представлено структурна схема засобу, що реалізує вказаний метод.



а) б)

Рисунок 7 – Засіб мультиспектрального контролю екологічного стану водних об’єктів за параметрами фітопланктону: а) структурна схема засобу контролю, б) зовнішній вигляд дослідного зразка

Пристрій містить пробу води з частинками фітопланктону 1, насос 2, CCD-камеру 3, мікроскоп 4, проточну вимірювальну кювету 5, зливну ємність 6, базу даних частинок фітопланктону 7, спеціалізований процесор 8, освітлювач 9, блок розрахунку індексів Сімпсона та Шеннона 10, індикатор 11.

Запропоновано метод мультиспектрального контролю екотоксичності, як інтегрального показника забрудненості поверхневих вод, з використанням біотестування по мікроводоростях, який на відміну від відомих, використовує опосередковане вимірювання концентрацій частинок мікроводоростей з обробленням результатів із застосуванням нейромережі та нейро-нечіткої мережі. На рис. 8 представлено структурну схему пристрою, що реалізує запропонований метод. Пристрій містить джерело випромінювання ДВ 1 з рівномірним спектром випромінювання від 270 до 1200 нм. Барабанний вузькосмуговий оптичний фільтр 2, що перемикається (ПОФ), з’єднано з редуктором 3 та кроковим двигуном 4. Позицією 5 кювети К з досліджуваними і контрольною пробою води з частинками фітопланктону та токсичними забруднювальними речовинами. Широкосмугова ПЗЗ-камера 6 підключено до персонального комп’ютера 7. Кроковий двигун КД 4 підключено до персонального комп’ютера ПК 7 через мікроконтролер МК 8.

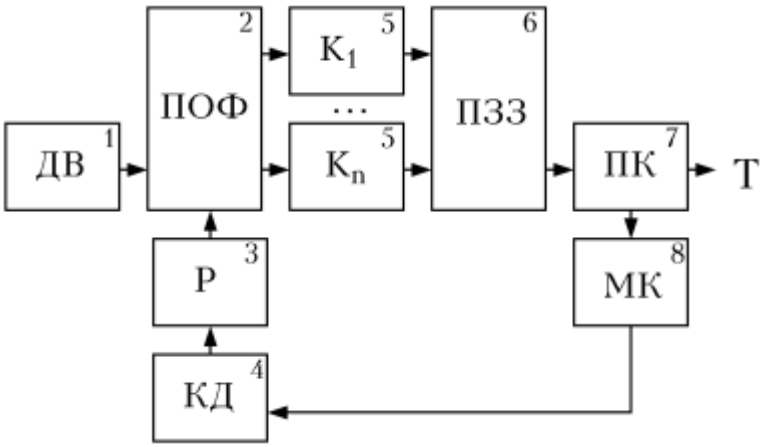
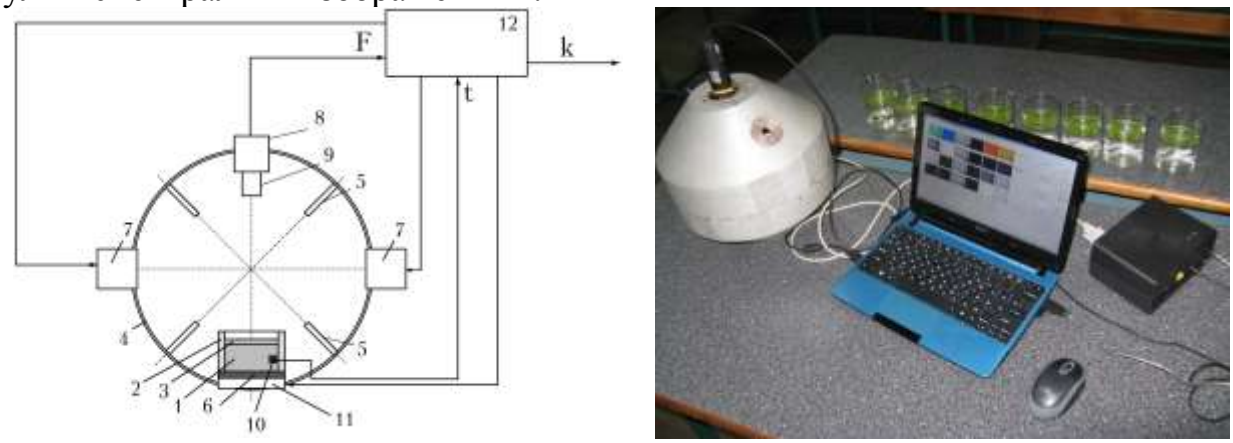


Рисунок 8 – Структурна схема засобу мультиспектрального контролю екотоксичності вод з використанням біотестування по мікроводоростях

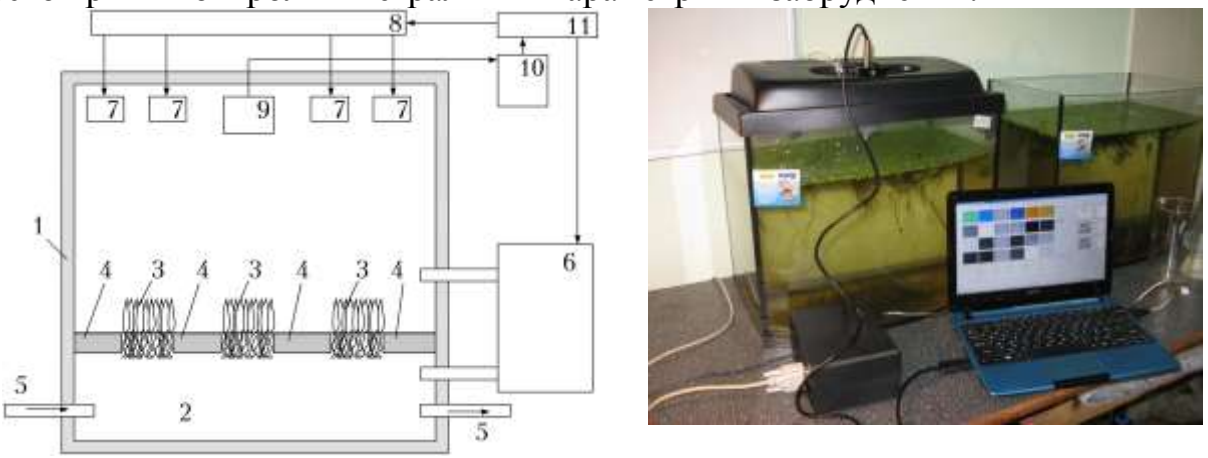
Вдосконалено метод та розроблено засіб мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод, що полягає у визначенні відносних розмірів сегментів поверхні водного середовища з вищими водними рослинами, які мають морфологічні зміни за результатами аналізу мультиспектральних зображень, отриманих широкосмуговою цифровою камерою при освітленні поверхні водного середовища джерелами випромінювання на характеристичних довжинах хвиль. При цьому використовують рослини ряски малої (*Lemna minor* L.) та за допомогою апаратно-програмного блоку керування та обробки мультиспектральних зображень визначають відносні розміри сегментів, які відповідають листецям ряски без морфологічних змін (A), з морфологічними змінами (B) і чистій поверхні води (C). Засіб контролю (рис. 9) містить модельне водне середовище 1 у кварцовій кюветі 2; плаваючий шар тест-об’єкта ряски малої 3; інтегрувальну сферу 4, екрани 5 та підложку 6 вкриті дифузно відбиваючим покриттям на основі сульфату барію, джерела випромінювання 7, CCD-камеру 8, об’єктив 9, давач температури 10, нагрівальний елемент 11, апаратно-програмний блок керування та обробки мультиспектральних зображень 12.



а) б)

Рисунок 9 – Засіб мультиспектрального екологічного контролю забруднення водних середовищ за допомогою ряски малої (Lemna minor L.): а) структурна схема засобу контролю, б) зовнішній вигляд дослідного зразка

Набув подальшого розвитку метод мультиспектрального вимірювального контролю інтегральних параметрів забруднення з використанням вищих водних рослин у комплексі для очищення стічних вод (рис. 10). Очищення стічних вод здійснюється за допомогою плаваючого шару вищих водних рослин, наприклад, ейхорнії (Eichhornia crassipes). У внутрішньому просторі біореактора підтримується температура, оптимальна для розвитку певного виду вищих водних рослин. У верхній частині корпусу розміщена ПЗЗ-камера, що формує масив мультиспектральних зображень вищих водних рослин. Блок керування та обробки мультиспектральних зображень на базі персонального комп'ютера дозволяє контролювати стан вищих водних рослин у біореакторі, що підвищує ефективність очищення стічних вод, а також забезпечує достовірний контроль інтегральних параметрів їх забруднення.



а) б)

Рисунок 10 – Комплекс для очищення стічних вод та мультиспектрального контролю інтегральних параметрів забруднення з використанням вищих водних рослин: а) структурна схема комплексу, б) зовнішній вигляд дослідного зразка

Комплекс містить корпус біореактора 1, заповнений водою 2, шаром вищих водних рослин 3 та плаваючим термоізолюючим матеріалом 4. До корпусу біореактора під'єднано трубопроводи подачі води на очищення та відводу очищеної води 5, систему терморегулювання внутрішнього простору і води 6. У корпусі біореактора розміщено вузькосмугові освітлювачі 7 підключені до блоку імпульсного керування освітлювачами 8. Також у корпусі біореактора розміщена ПЗЗ-камера 9, що з'єднана з входом блоку керування та обробки мультиспектральних зображень на базі персонального комп'ютера 10, який під'єднано через мікроконтролерний пристрій 11 до блоку імпульсного керування освітлювачами 8 та системи терморегулювання внутрішнього простору і води 6.

Вдосконалено оцінювання екологічного стану водних об'єктів, сутність якого полягає у опосередкованому мультиспектральному визначенні біомаси та співвідношення між пігментним параметрами у приповерхневому шарі водних об'єктів з використанням запропонованих регресійних рівнянь. Структурна схема засобу дистанційного мультиспектрального контролю екологічного стану водних об'єктів наведена на рис. 11. На основі просторового розподілу біомаси

та співвідношення пігментних параметрів у приповерхневому шарі водних об’єктів це дозволяє сегментувати зображення поверхні водного об’єкта для визначення зон найбільшого забруднення. Обробка мультиспектральних зображень плаваючих та повітряно-водних макрофітів дозволяє ідентифікувати їх видовий склад та розрахувати проективне покриття водного дзеркала, що є необхідним біологічними показниками екологічного стану водних об’єктів. Дослідний зразок засобу дистанційного екологічного контролю на основі мультиспектрального методу реалізовано на базі квадрокоптера DJI Mavic Pro та мультиспектральних камер серії CMS.

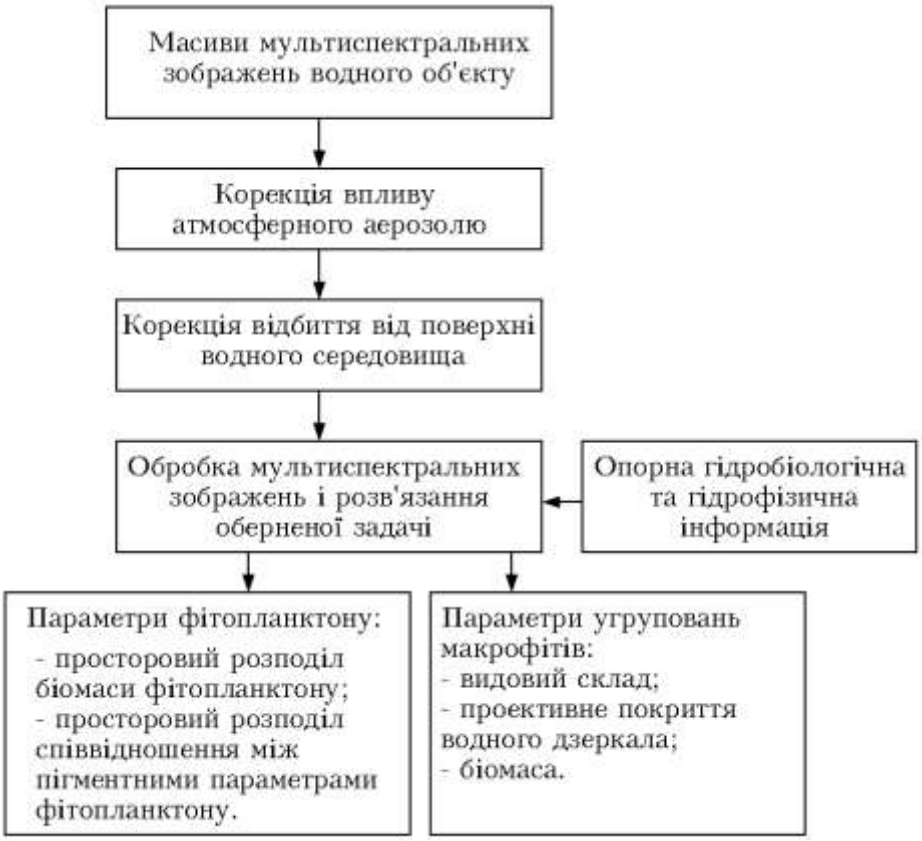


Рисунок 11 – Структурна схема засобу дистанційного мультиспектрального контролю екологічного стану водних об’єктів

У четвертому розділі розроблено структурні схеми засобів мультиспектрального екологічного контролю та здійснено аналіз їх метрологічних характеристик.

Розв’язана задача оптимального вибору параметрів вимірювальних засобів, зокрема, кількості спектральних каналів, робочих довжин хвиль та ширини. Використаємо процедуру виконання множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних у програмі STATISTICA 6.1. Результати розрахунків на кожному кроці множинної регресії наведено у табл. 1. Вибір параметрів визначається необхідною точністю опосередкованого вимірювання параметрів водних середовищ, що забезпечить достатню достовірність контролю.

Таблиця 1 – Приклад розв’язку оберненої задачі визначення концентрації фітопланктону у водних середовищах основі результатів мультиспектральних вимірювань за допомогою множинної регресії

N	λ, нм	F	Δ	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

Засіб мультиспектрального екологічного контролю працює безпосередньо на водних об’єктах з використанням квадрокоптера з мультиспектральними камерами серії CMS (Silios Technologies, France) із спектральним діапазон 400 – 700 нм для камери типу CMS-C, 550–850 нм – CMS-V та 650–950 нм – CMS-S. Спектральна характеристика чутливості мультиспектральних камер цієї серії наведена на рис. 12, б–г.

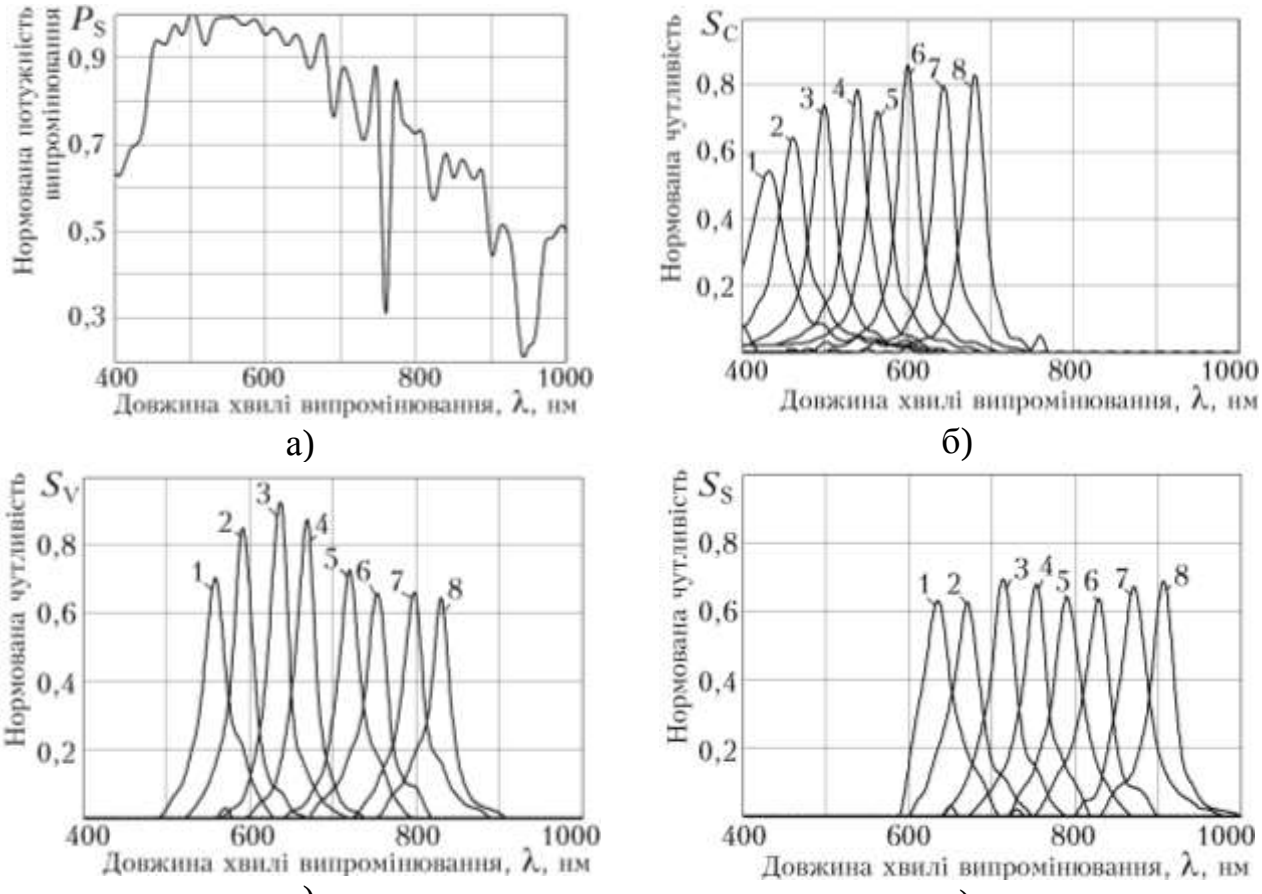


Рисунок 12 – Нормовані спектральні характеристики: а) природного сонячного випромінювання; камери б) CMS-C; в) CMS-V; г) CMS-S за довідниковими даними

У якості джерела випромінювання використовується природне сонячне випромінювання, усереднена спектральна характеристика щільності випромінювання якого з урахуванням поглинання у атмосфері наведена на рис. 12, а. Оскільки спектральні характеристики природного сонячного випромінювання на рівні водної поверхні постійно змінюються, то необхідно здійснювати нормування результатів мультиспектральних вимірювань з квадрокоптера відносно зразкового засобу вимірювання (ламбертівський еталон) з відомими спектральними характеристиками. Крім того, здійснено розрахунок мультиспектральних параметрів при зміні біомаси або пігментних параметрів фітопланктону та використанні мультиспектральних камер серії CMS, а також складено регресійні рівняння за допомогою множинної регресії для опосередкованого вимірювання параметрів за результатами мультиспектральних вимірювань.

Випадкова складова інструментальної похибки для опосередкованого вимірювання параметрів визначається випадковими складовими похибки у кожному із спектральних каналів, а також складовими, що враховують кореляційний зв'язок між мультиспектральними параметрами:

$$\delta_{\text{rand.f.}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \delta^2{}_{rand.Mi} + 2\sum_{i=1}^{N}\sum_{j<i} R_{ij}\delta_{rand.Mi}\delta_{rand.Mj}}\,, \qquad (14)$$

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

Приклад залежності випадкової складової похибки вимірювання біомаси фітопланктону у водних середовищах від кількості спектральних каналів наведена на рис. 13, а. Методична складова похибки вимірювань зменшується при збільшенні кількості спектральних каналів (рис. 13, б). Загальна похибка вимірювань параметрів водних середовищ визначається, як сума інструментальної і методичної складової похибок (рис. 13, в). При цьому оптимальна кількість спектральних каналів засобу мультиспектральних вимірювань обирається з компромісних міркувань між зростанням випадкової складової похибки при зростанні кількості каналів та зменшенні методичної похибки за рахунок більш точного відображення регресійним рівнянням математичної моделі водного середовища.

Проаналізовано роботу дослідного зразка засобу мультиспектрального екологічного контролю водних середовищ за критеріями забезпечення достатньої глибини різкості та точності вимірювання площі порушеної ділянки об'єкту дослідження. Отримане значення похибки вимірювання площі порушеної ділянки об'єкту дослідження, що становить 0,48 %, достатнє для використання розробленого засобу для задач екологічного моніторингу. Оскільки точність вимірювання площі порушеної ділянки визначається двома основними факторами, а саме розсіюванням випромінювання у приповерхневому шарі водного середовища та обмеженою роздільною

здатністю фотоматриці, то подальше підвищення роздільної здатності фотоматриці не призведе до зменшення похибок вимірювання площі, оскільки вони будуть обмежуватись розмиттям зображення за рахунок розсіювання у приповерхневому шарі.

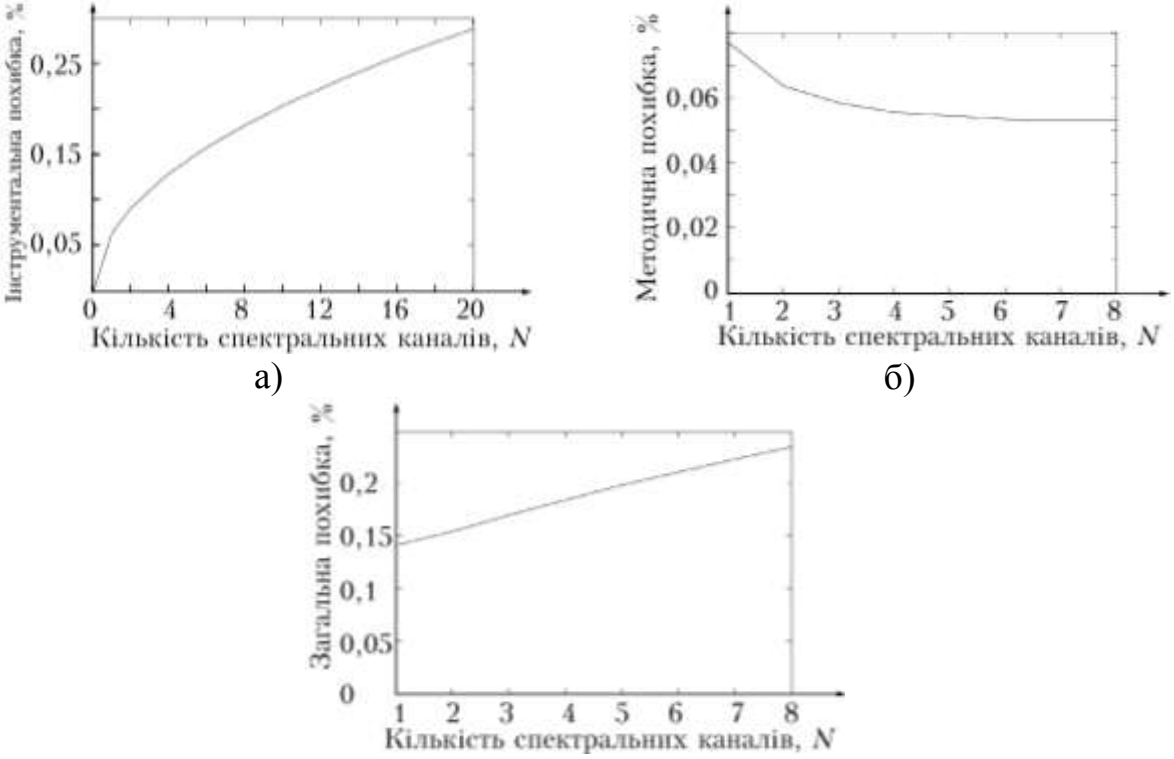


Рисунок 13 – Приклад залежності похибок опосередкованого вимірювання біомаси фітопланктону у водних середовищах мультиспектральним методом від кількості спектральних каналів: а) інструментальної, б) методичної, в) загальної похибки

Набула подальшого розвитку модель поширення випромінювання у водних середовищах з вищими водними рослинами, що враховує ефект локалізованого поглинання випромінювання. Показано, що локалізоване поглинання випромінювання призводить до зменшення сумарного показника поглинання водних середовищ у порівнянні з рівномірним розподілом хромофорів у об’ємі середовища. Наслідком цього є збільшення глибини проникнення світла в середовище і збільшення коефіцієнта його дифузного відбиття. При цьому показник поглинання водного середовища з поправкою на ефект локалізованого поглинання:

$$k(\lambda) = k_{\text{A}}(\lambda) f_{\text{A}} + Ck_{\text{B}}(\lambda) f_{\text{B}} + k_{\text{C}}(\lambda)(1 - f_{\text{A}} - f_{\text{B}}) = K_{\text{A}}(\lambda) + K_{\text{B}}(\lambda) + K_{\text{C}}(\lambda), \quad (15)$$

де λ – довжина хвилі, k_{A} і k_{B} – показники поглинання однорідно розчинених у об’ємі середовища речовин і локалізованих поглиначів; f_{A} і f_{B} – їх об’ємні концентрації, $k_{\text{Ñ}}$ – показник поглинання основної частини середовища, K_{A}, K_{B}, K_{C} – внески відповідних компонент в сумарне поглинання, C – поправочний коефіцієнт, що враховує ефект локалізованого поглинання випромінювання розсіювальними частинками.

Залежно від форми та розмірів розсіювачів зміна глибини проникнення і коефіцієнта відбиття може бути досить значною. Зокрема, без врахування ефекту локалізованого поглинання випромінювання у водних середовищах похибки вимірювання їх параметрів можуть досягати 70-80%, що не дозволятиме використовувати такі засоби для прикладних задач екологічного контролю. При врахуванні даного ефекту та внесенні відповідних поправочних коефіцієнтів загальна похибка вимірювань становить не більше 0,5%.

Для розроблених засобів мультиспектрального екологічного контролю оцінена достовірність контролю, що визначається похибками у вимірювальних каналах, а також залежить від обраних робочих довжин хвиль спектральних каналів, їх діапазону та кількості каналів. Зокрема, при використанні чотирьох спектральних каналів (530, 590, 620, 730 нм) отримано значення достовірності контролю співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом 0,939, а при використанні трьох спектральних каналів (450, 470, 660 нм) отримано значення достовірності контролю співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом 0,972. При контролі біомаси фітопланктону у водних об’єктах і використанні чотирьох спектральних каналів значення достовірності складає 0,974, що дозволяє використовувати розроблений засіб мультиспектрального екологічного контролю у спеціалізованих лабораторіях природоохоронних установ.

У п’ятому розділі розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів для прикладних задач екологічного моніторингу.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для мультиспектрального екологічного контролю Multispectral devices 1.029. Розроблена програма реалізує методики опрацювання мультиспектральних зображень для контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об’єктів. У програмі використовуються регресійні рівняння у виді поліномів 5-го порядку. При опрацюванні результатів мультиспектрального екологічного контролю здійснюється сегментація зображень та розрахунок відносних розмірів зон зображення.

Вдосконалено систему контролю параметрів забруднення водних середовищ за допомогою мультиспектрального методу з використанням біотестування та різних типів нейромереж для обробки результатів. Найменшу тестову помилку забезпечила нейромережа на основі багатошарового персептрона з двома прихованими шарами.

При багатопараметричному мультиспектральному контролі достовірність буде визначатись таким чином:

$$D = \prod_{i=1}^{n} D_i , \qquad (16)$$

де D_i – достовірність контролю у одному спектральному каналі; i – номер каналу, n – кількість спектральних каналів.

Оцінено достовірність контролю токсичності стічних вод мультиспектральним методом з використанням нейромережі та значення ймовірності помилки першого роду 0,022, ймовірність помилки другого роду 0,016, достовірність контролю токсичності 0,962, що достатні для використання розробленого засобу контролю у спеціалізованих лабораторіях природоохоронних закладів. Для розв'язання оберненої задачі опосередкованого вимірювання концентрації частинок фітопланктону у водних середовищах за результатами мультиспектральних вимірювань використано нейро-нечітку мережу ANFIS. За результатами навчання нейро-нечіткої мережі у ході 25 ітерацій отримано похибку опосередкованого вимірювання концентрації частинок фітопланктону 3,7 %.

У шостому розділі розроблено науково-методичні рекомендації та здійснено експериментальні дослідження роботи технічних засобів мультиспектрального екологічного вимірювального контролю інтегральних параметрів забруднення водних середовищ за допомогою біотестування, а також оцінювання екологічного стану водних об'єктів з використанням біоіндикації по фітопланктону та вищим водним рослинам. Розроблені науково-методичні рекомендації застосування мультиспектральних методів та засобів відповідають вимогам чинних вітчизняних та міжнародних нормативних документів в галузі охорони водних ресурсів та дозволяють підвищити ефективність контролю екологічного стану водних об'єктів.

При використанні у якості тест-об'єкту зелених протококових водоростей *Chlorella vulgaris* Beijer або *Scenedesmus quadricauda* (Turp) Breb необхідно встановити відмінності між інтенсивністю росту водоростей у досліджуваній пробі і культуральному середовищі (ISO 8692:2012, КНД 211.1.4.058-97). Мультиспектральним методами і засобом вимірюється концентрація частинок фітопланктону у кюветах за допомогою регресійного рівняння. Час експозиції складає 96 годин для визначення наявності гострої токсичної дії та 14 діб для визначення наявності хронічної токсичної дії.

При використанні у якості тест-об'єкту ряски малої (*Lemna minor* L.) у пробах відзначають збереження або зміну морфологічних ознак її листеців, зокрема, зміну забарвлення (пожовтіння або збліднення (хлороз), повне знебарвлення (некроз)) в дослідних і контрольних пробах. Мультиспектральними методами і засобами вимірюється відносна площа поверхні водного середовища вкрита рослинами ряски без морфологічних змін, зі змінами та чиста поверхня водного середовища. Відповідно до ISO 20079:2005 визначення показника токсичного впливу проводиться протягом 7 діб.

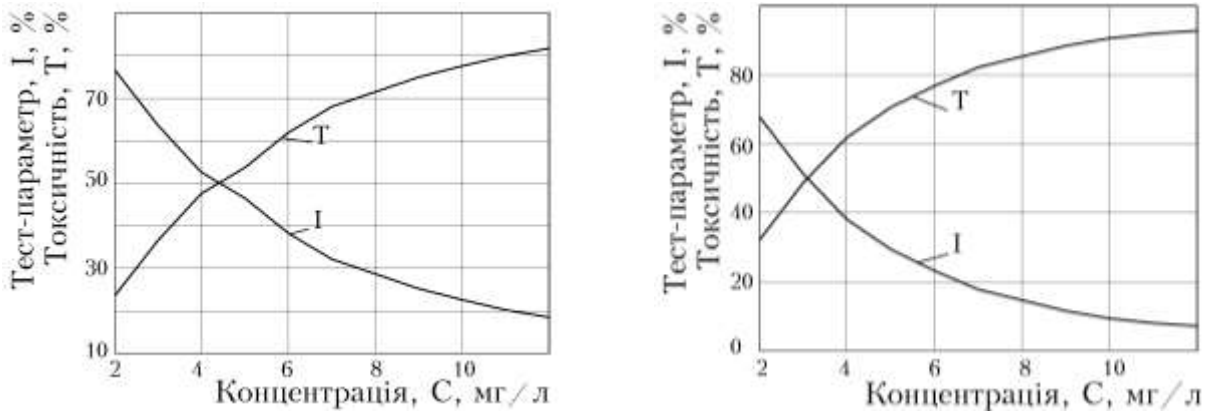
Відбір, транспортування і зберігання проб здійснено відповідно до чинних нормативних документів, зокрема, стандартів серії ДСТУ ISO 5667.

Здійснено експериментальні дослідження токсичності стічних вод за допомогою біотестування, що дозволило оцінити їх вплив на екологічний стан водних об'єктів. За допомогою регресійного аналізу у програмі MathCAD досліджено чутливість тест-об'єктів до впливу забруднювальних речовин.

Отримані значення коефіцієнту кореляції 0,303 вказують на наявність слабкого зв’язку між концентрацією хлорид-іонів та тест-параметром.

У відповідності з ДСТУ ГОСТ 30333:2009 на хімічні речовини розробляють паспорт безпеки у якому вказується інформація, що стосується екотоксичності для певних тест-об’єктів. Для біотестування хімічної речовини або суміші хімічних речовин готують вихідний розчин, використовуючи дистильовану воду. За допомогою розробленого засобу мультиспектрального контролю з використанням тест-об’єкту культури водорості хлорела (*Chlorella vulgaris* Beijer) та ряски малої (*Lemna minor* L.) здійснено експериментальні дослідження екотоксичності пестицидних хімічних препаратів Раундап (виробник – MONSANTO Europe S.A.) та Бі-58 (виробник – BASF), а також інших хімічних препаратів.

Проведено дослідження хімічного складу відходів електронної промисловості та оцінено їх вплив на довкілля, зокрема, зразків шламу гальванічного виробництва. Методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії встановлено, що зразок містить оксиди та гідрооксиди важких металів і підпадає під 3 клас небезпеки. За допомогою розроблених засобів здійснено експериментальні дослідження контролю токсичності небезпечних компонентів шламу гальванічного виробництва у водних середовищах мультиспектральним методом. Результати контролю токсичності води з наявністю небезпечних компонентів шламу гальванічного виробництва методом біотестування з використанням тест-об’єкту культури водорості хлорела (*Chlorella vulgaris* Beijer) та ряски малої (*Lemna minor* L.) за допомогою розробленого засобу мультиспектрального контролю наведені на рис. 14. Запропоновані методи та розроблені засоби мультиспектрального екологічного контролю дозволили оцінити комплексний вплив небезпечних компонентів відходів на екологічний стан водних об’єктів.



а) б)

Рисунок 14 – Залежність тест-параметру та токсичності води з наявністю небезпечних компонентів шламу гальванічного виробництва методом біотестування з використанням тест-об’єкту культури водорості хлорела (*Chlorella vulgaris* Beijer) та ряски малої (*Lemna minor* L.)

Здійснено контроль токсичності колодязної питної води децентралізованого водопостачання м. Вінниці мультиспектральними методами

і засобами за допомогою біотестування з використанням тест-об’єкту культури водорості хлорела (*Chlorella vulgaris* Beijer) та ряски малої (*Lemna minor* L.), а також вимірювання забруднювальних речовин азот амонійний, азот нітратний, азот нітритний. В наслідок проникнення у водоносні шари мінеральних і органічних добрив, стоків від місць складування твердих відходів, рідких стоків зустрічається перевищення рівня ГДК по азоту амонійному та азоту нітратному. При дослідженні тест-об’єктів до впливу забруднювальних речовин, отримано значення коефіцієнту кореляції понад 0,72, що вказує на наявність сильного кореляційного зв’язку між концентрацією азоту амонійного та азоту нітратного з тест-параметрами.

Експериментальні дослідження екологічного стану водних об’єктів здійснено мультиспектральними методами для р. Південний Буг з використанням біоіндикації за характеристиками макрофітів. На підставі отриманих даних щодо стану розвитку макрофітів проведено кореляційний аналіз з метою визначення взаємопов'язаних параметрів водних об’єктів. Особливо виражений зворотній взаємозв'язок має місце між середньою глибиною водойм і заростанням акваторій (r =-0,716), дещо слабший між середньою глибиною і біомасою макрофітів (r =-0,504). Ці залежності можливо пояснити накопиченням біогенних речовин на ділянках річки з малою глибиною, а також кращим розвитком певних видів макрофітів на ділянках з малою швидкістю течії. Аналіз результатів статистичної обробки показників якості поверхневих вод р. Південний Буг за гідрохімічними показниками та їх порівняння з результатами експериментальних досліджень та математичного моделювання розвитку і продукції макрофітів дозволяє контролювати інтегральний рівень забруднення р. Південний Буг. При цьому дослідження показало, що домінуюче положення займають проби, які належать до ІІІ класу якості води 4–5 категорії, що відповідає слабко і помірно забрудненим водам. За трофічним статусом вони знаходяться у діапазоні від евтрофних до евполітрофних, за сапробністю від β''–мезосапробних до α'–мезосапробних.

З використанням розроблених методів та засобів досліджено екологічний стан водних об’єктів підприємства «Енергогарант» ТОВ (Вінницька область). При цьому екологічна класифікація якості поверхневих вод ставків проведена за трофо-сапробіологічними (еколого-санітарними) критеріями. В результатів аналіз за критеріями вмісту специфічних речовин токсичної та радіаційної дії, а також за рівнем токсичності перевищень гранично допустимих рівнів не виявив. Основною проблемою для досліджуваних водних об’єктів є перевищення гранично допустимих рівнів вмісту біогенних речовин, зокрема, азоту нітратного. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано використання природоохоронних заходів у вигляді біофільтрації води з використанням вищих водних рослин, а саме ейхорнії (Eichhornia crassipes). Крім того, за допомогою мультиспектральних методів та засобів досліджено ріст і розвиток рослин ейхорнії протягом вегетаційного періоду. Отже, застосування мультиспектральних методів і засобів на практиці забезпечило ефективний контроль екологічного стану водних об’єктів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

За результатами дисертаційних досліджень, які є завершеною науковою працею, вирішено актуальну наукову проблему розвитку наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів, які враховують вплив їх характеристик і параметрів, на ефективність процесу контролю забрудненості водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів, що є передумовою та підґрунтям ефективного управління їх екологічною безпекою. Отже, основні наукові результати роботи такі:

1. В результаті аналізу наукової проблеми з'ясовано, що при оцінюванні комплексного впливу забруднюючих речовин на екологічний стан водного об'єкта з використанням синергетичного підходу необхідно обов'язково врахувати вплив на біологічні показники, зокрема, на показники біомаси і видового складу фітопланктону та вищих водних рослин. Крім того, відповідно до Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЄС, контроль інтегральних показників забруднення вод повинен базуватись на їх екотоксичності, яка визначається за допомогою біотестування і дозволяє врахувати синергетичну взаємодію забруднюючих речовин. Було проаналізовано сучасні методи і засоби контролю параметрів забруднення водних середовищ та оцінювання екологічного стану водних об'єктів, що показало їх недосконаліть та неспроможність вирішення задачі за рахунок низької достовірності контролю пов'язаної з недостатньою точністю вимірювання параметрів та зумовило необхідність вдосконалення методів і засобів мультиспектрального екологічного контролю.

2. Обґрунтовано методологію і методи проведення теоретичних та експериментальних досліджень, що включили теоретичні методи аналізу та узагальнення світового досвіду; методи теорії перенесення випромінювання у багатошарових світлорозсіювальних водних середовищах; методи математичної статистики для обробки параметрів водних середовищ та оптимального вибору спектральних каналів технічних засобів контролю; методи математичного моделювання динаміки популяцій фітопланктону на основі систем рекурентних рівнянь; використання нейромереж та нейро-нечітких мережі для розв'язання оберненої задачі визначення параметрів водних середовищ; традиційні фізико-хімічні методи вимірювання параметрів забруднення водних середовищ; методи аналізу мультиспектральних зображень, їх сегментації та фільтрації для обробки експериментальних результатів; методи теорії вимірювань для оцінювання метрологічних характеристик та параметрів розроблених дослідних технічних засобів мультиспектрального контролю.

3. Вдосконалено математичні моделі водних середовищ з фітопланктоном та вищими водними рослинами для розв'язку прямої задачі формування їх мультиспектральних зображень технічними засобами мультиспектрального контролю. Зокрема, вдосконалено математичні моделі процесу світлорозсіювання у шарах водного середовища з фітопланктоном, що дозволило вперше виявити відносний його внесок окремих шарів у загальний коефіцієнт дифузного відбиття та розраховувати глибину водного об'єкта, на

якій цей внесок матиме значення в межах похибки вимірювань. Також, вдосконалено математичну модель процесу поширення випромінювання у водних середовищах з вищими водними рослинами, що враховує ефект локалізованого поглинання випромінювання на їх спектральні характеристики, що дозволило ввести відповідні поправочні коефіцієнти, які враховують форму та розміри розсіювачів, і зменшити похибку вимірювань біомаси та співвідношення між пігментами.

4. На основі розв'язання оберненої задачі визначення параметрів забруднення водних середовищ і екологічного стану водних об'єктів за їх мультиспектральними зображеннями запропоновано методи мульти-спектрального екологічного контролю поверхневих вод, зокрема:

– науково обґрунтовано та розроблено метод мультиспектрального контролю екотоксичності, як інтегрального показника забруднення поверхневих вод, з використанням опосередкованого вимірювання концентрації частинок мікроводоростей з обробленням результатів із застосуванням нейромережі та нейро-нечіткої мережі;

– науково обґрунтовано та запропоновано метод мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод водних об'єктів, сутність якого полягає у визначенні відносних розмірів сегментів поверхні водного середовища з вищими водними рослинам, які мають морфологічні зміни за результатами аналізу мультиспектральних зображень, отриманих широкосмуговою цифровою камерою при освітленні поверхні водного середовища вузькосмуговими джерелами випромінювання;

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

– вдосконалено метод опосередкованого мультиспектрального вимірювання біомаси та співвідношення пігментних параметрів у приповерхневому шарі водних об'єктів з використанням запропонованих регресійних рівнянь;

– набуло подальшого розвитку застосування методу 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 з визначенням концентрацій основних пігментів із застосуванням запропонованої експертної системи на базі нечіткої логіки або нейромережі.

5. Науково обґрунтовано оптимальну кількість спектральних каналів та їх параметри для технічних засобів мультиспектрального контролю забрудненості водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних. Для розроблених засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ оцінена достовірність контролю, що склала від 0,939 до 0,974 в залежності від спектральних характеристик вимірювальних каналів та їх кількості.

6. Науково обґрунтовано схемні рішення та виготовлено дослідні зразки удосконалених технічних засобів мультиспектрального екологічного контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об’єктів на основі опосередкованих вимірювань біомаси фітопланктону та вищих водних рослин, а також співвідношень між їх основними пігментами.

7. 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 технічними засобами контролю, а також сегментацію та фільтрацію мультиспектральних зображень і їх обробку з використанням регресійних рівнянь, нейромережі та нейро-нечіткої мережі.

8. 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 екологічною безпекою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

І. Монографії.

1. Черноволик Г. О., Петрук В. Г., Кватернюк С. М. Мультиспектральний вимірювальний контроль та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ на основі нечіткої логіки : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2015. 140 с.
2. Petruk V., Kvaternyuk S., Pohrebennyk V. et al. Experimental studies of phytoplankton concentrations in water bodies by using of multispectral images. *Water Supply and Wastewater Removal* : monograph / editors: Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. Lublin : Lublin University of Technology, 2016. P. 61–171.
3. Petruk V., Kvaternyuk S., Bondarchuk O. et al. Multispectral Methods and Means of Water Pollution Monitoring by Using Macrophytes for Bioindication. *Water Security* : monograph / editors: O. Mitryasova, C. Staddon. Mykolaiv: PMBSNU – Bristol: UWE, 2016. P. 131–141.
4. Ishchenko V., Kvaternyuk S., Styskal O. Assessment of water pollution by bioindication method. *Water Security* : monograph / editors: O. Mitryasova, C. Staddon. Mykolaiv: PMBSNU – Bristol: UWE, 2016. P. 21–30.

ІІ. Статті у наукових фахових виданнях України

5. 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. (*РИНЦ, Google Scholar*)

6. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 1. С. 15–22. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
7. Кватернюк С. М. Аналіз структурних схем засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2017. № 1. С. 54–60. (*РИНЦ, Google Scholar*)
8. Кватернюк С. М. Оптимальний синтез засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2017. № 2. С. 4–11.
9. Кватернюк С.М. Аналіз похибок засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2017. № 4. С. 116–119. (*Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography*)
10. Кватернюк С. М. Аналіз похибок вимірювання площі ушкоджених ділянок неоднорідних біологічних середовищ мультиспектральним методом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 4. С. 15–21. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
11. Кватернюк С. М. Дослідження впливу ефекту локалізованого поглинання випромінювання у розсіювальних частинках на мультиспектральні вимірювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 5. С. 24–30. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
12. Kvaternyuk S. M. Multispectral television measuring control of integral parameters of pollution using higher aquatic plants in a complex for sewage treatment. *Environmental problems*. 2017. Vol. 2, No. 3. P. 121–126.
13. Kvaternyuk S. M. Multispectral control of pesticide concentrations in aquatic environments using bioindication on phytoplankton. *Environmental problems*. 2017. Vol. 2, No. 4. P. 205–210.
14. Кватернюк С. М. Контроль екологічної безпеки стічних вод за допомогою мультиспектрального методу та біоіндикації по фітопланктону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 6. С. 26–33. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
15. Кватернюк С. М. Оцінювання достовірності контролю токсичності стічних вод мультиспектральним методом з використанням нейромережі. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2017. № 3. С. 76–81.
16. Кватернюк С. М. Математичне моделювання природних водних середовищ для задач екологічного контролю. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2018. № 2. С. 252–255. (*Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography*)

17. Кватернюк С. М. Мультиспектральні вимірювання біомаси фітопланктону у водних середовищах для задач екологічного контролю. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 2. С. 7–13. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
18. Кватернюк С. М. Оцінювання достовірності мультиспектрального екологічного контролю біомаси фітопланктону у водних середовищах. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2018. № 3. С. 275–278. (*Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography*)
19. Кватернюк С. М. Мультиспектральні вимірювання пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах [Електронний ресурс] *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*: електрон. наук. фахове вид. 2018. № 2. С. 1–8. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/545/530 (дата звернення: 17.10.2018). (*РИНЦ*)
20. 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. 89–96. (*РИНЦ, Google Scholar*)
21. Кватернюк С. М. Оцінювання достовірності мультиспектрального екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2018. № 5. С. 128–131. (*Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography*)
22. Кватернюк С. М., Петрук В. Г. Мультиспектральний екологічний контроль інтегральних параметрів забруднення водних об’єктів. *Екологічні науки*. 2018. № 2(21). С. 133–137.
23. Kvaternyuk S. M., Petruk V. G. Multispectral ecological control of biomass of phytoplankton in aqueous media in situ using quadrocopter. *Environmental problems*. 2018. Vol. 3(2). P. 133–138.
24. Кватернюк С. М. Мультиспектральний екологічний контроль пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах з використанням квадрокоптера**.** *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68), № 4. С. 47–52.
25. Іщенко В. А., Коріненко М. С., Кватернюк С. М. Розроблення схеми екологічної мережі Немирівського району Вінницької області. *Екологічна безпека та природокористування*. 2012. Вип. 11. С. 88–94.
26. Кватернюк С. М., Іщенко В. А., Кватернюк О. Є. Оцінювання екологічного стану водних об’єктів м. Вінниці на основі показників біоіндикації по фітопланктону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. № 6. С. 13–16. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)
27. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Левченко О. Ю. та ін. Обробка зображень частинок для автоматизованого контролю забруднення водних середовищ.

Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2011. № 1(21). С. 44–50. (*РИНЦ, Google Scholar*)

28. 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. (*РИНЦ, Google Scholar*)

29. Абрамович М. Д., Дік С. К., Кватернюк С. М., Петрук В. Г. Вивчення глибинної структури когерентної складової і некогерентного фону багатократно розсіяного світлового поля при широкій варіації структурних і біофізичних параметрів біотканин. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 6. С. 90–95. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)

30. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Кватернюк О. Є. та ін. Аналіз сучасного стану оптичних засобів вимірювального контролю та діагностування параметрів біотканин на основі цифрової колориметрії. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 1. С. 172–177. (*Google Scholar, Index Copernicus International*)

31. Петрук В. Г., Кватернюк О. Є., Любчак Ю. С., Кватернюк С. М. Розвиток методу цифрової колориметрії біотканин та алгоритм опрацювання результатів. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2015. № 3. С. 198–201.

32. Петрук В. Г., Кватернюк С. М. , Кватернюк О. Є. та ін. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 3. С. 50–56. (*РИНЦ, Index Copernicus International*)

III. Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

33. Petruk R. V., Pohrebennyk V. D., Kvaternyuk S. M. et al. Multispectral television monitoring of contamination of water objects by using macrophyte-based bioindication. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016* : SGEM2016 Conference Proceedings. (Albena, Bulgaria, June 30 – July 6, 2016). Book 5, Vol. 2. P. 597–602. doi: 10.5593/sgem2016B52. ISSN 1314-2704. (*Scopus і Web of Science*)

34. Petruk V., Kvaternyuk S., Yasynska V. et al. The method of multispectral image processing of phytoplankton for environmental control of water pollution. *Proc. SPIE*. 2015. Vol. 9816, 98161N. P. 98161N-1–98161N-5. doi: 10.1117/12.2229202. ISSN 0277-786X. (*Scopus і Web of Science*)

35. Petruk V., Kvaternyuk S., Kozachuk A. et al. Multispectral televisional measuring control of the ecological state of waterbodies on the characteristics macrophytes. *Proc. SPIE*. 2015. Vol. 9816, 98161Q. P. 98161Q-1–98161Q-4. doi: 10.1117/12.2229343. ISSN 0277-786X. (*Scopus і Web of Science*)

36. Petruk V. G., Kvaternyuk S. M.; Denysiuk Y. M. et al. The spectral polarimetric control of phytoplankton in photobioreactor of the wastewater treatment. *Proc. SPIE*.

2012, Vol. 8698, 86980H. P. 86980H-1–86980H-4. doi: 10.1117/12.2019736. ISSN 0277-786X. (*Scopus i Web of Science*)
37. Барун В. В., Иванов А. П., Петрук В. Г., Кватернюк С. М. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. I. Спектры отражения. *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2010. № 3. С. 90–98. ISSN 1818-9830.
38. Барун В. В., Иванов А. П., Петрук В. Г., Кватернюк С. М. Развитие оптических методов диагностики биологических тканей по рассеянному излучению. II. Поляризационная пространственно-разрешающая спектроскопия. *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2010. № 4. С. 79–89. ISSN 1818-9830.
39. Petruk V., Kvaternyuk S., Kvaternyuk O. et al. Assessment of the validity of the diagnosis of damage of tissues by multispectral method using neural network. *Przeglad elektrotechniczny*. 2017. Vol. 93. № 5. P. 106-109. doi:10.15199/48.2017. 05.21. ISSN 0033-2097. (*Scopus i Web of Science*)
40. Kvaternyuk S., Pohrebennyk V., Petruk R. et al. Multispectral television measurements of parameters of natural biological media. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017* : SGEM2017 Conference Proceedings. (Albena, Bulgaria, June 29 – July 5, 2017). Issue 51, Vol. 17. P. 689–696. doi: 10.5593/sgem2017/51. ISSN 1314-2704. (*Scopus i Web of Science*)
41. Kvaternyuk S., Petruk V., Kvaternyuk O. et al. Multispectral measurement of parameters of particles in heterogeneous biological media. *Proc. SPIE*, 2018. Vol. 10808, 108083K. P. 108083K-1–108083K-8. doi: 10.1117/12.2501590. ISSN 0277-786X. (*Scopus i Web of Science*)
42. Kvaternyuk S., Pohrebennyk V., Petruk R., Kvaternyuk O. Increasing the accuracy of multispectral television measurements of phytoplankton parameters in aqueous media. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017* : SGEM2017 Vienna GREEN Conference Proceedings. (Vienna, Austria, 27–29 November, 2017). Vol. 17, Issue 33. P. 219–225. doi: 10.5593 /sgem2017H/33/S12.027. ISSN 1314-2704.
43. Kvaternyuk S., Kvaternyuk O., Petruk R. et al. Indirect measurements of the parameters of inhomogeneous natural media by a multispectral method using fuzzy logic. *Proc. SPIE.* 2018. Vol. 10808, 108082P. P. 108082P-1–108082P-7. doi: 10.1117/12.2501636. ISSN 0277-786X. (*Scopus i Web of Science*)
44. Kvaterniuk S., Pohrebennyk V., Petruk V. et al. Mathematical modeling of light scattering in natural water environments with phytoplankton particles. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018* : SGEM2018 Conference Proceedings. (Albena, Bulgaria, 2–8 July, 2018). Vol. 18, Issue 2.1. P. 545–552. doi: 10.5593/sgem2018/2.1. ISSN 1314-2704. (*Scopus i Web of Science*)

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

IV. Тези та матеріали конференцій.

45. Martsenyuk V., Petruk V. G., Kvaternyuk S. M. et al. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton. *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016)* : ICCAS 2016 Conference Proceedings. (HICO, Gyeongju, Korea, Oct. 16-19, 2016). – P. 988–993. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832429. (*Scopus i Web of Science*)
46. Бондарчук О. В., Кватернюк С. М. Біотестування як інструмент екологічного моніторингу якості водних об'єктів річки Південний Буг. *Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. мол. вчених. (м. Одеса, 1–3 червня 2016 р.). Одеса, 2016. С. 43–45.
47. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Петрук Р. В. та ін. Телевізійний вимірювальний контроль забруднення води хлорорганічними сполуками методом біоіндикації по фітопланктону. *Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС-2015»* : тез доп. VII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 21–23 квітня 2015 р.). Вінниця, 2015. С .120.
48. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Колесник Т. В., Попапенко О. В. Математичне моделювання переносу оптичного випромінювання у водному середовищі з водоростями для задач екологічного контролю. *Екологічна безпека держави* : тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф. мол. учених та студ. (м. Київ, 16 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 116.
49. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Животун Я. І., Каська І. І. Екологічний контроль стану водних об'єктів за характеристиками макрофітів на основі мультиспектральних зображень. *Екологічна безпека держави* : тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф. мол. учених та студ. (м. Київ, 16 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 117.
50. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Стискал О. А. та ін. Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль інтегральних параметрів забруднення водних об'єктів за допомогою біоіндикації по фітопланктону. *Екологічна безпека держави* : тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф. мол. учених та студ. (м. Київ, 16 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 118.
51. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Використання мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю для дослідження угруповань макрофітів. *V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 23–26 вересня 2015 р.). Вінниця, 2015. С. 245.
52. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Мультиспектральний контроль забруднення атмосферного повітря з використанням біосенсорів та ліхеноіндикації. *V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 23–26 вересня 2015 р.). Вінниця, 2015. С. 246.
53. Петрук В.Г., Кватернюк С.М., Іванов А.П. та ін. Дистанційний мультиспектральний телевізійний моніторинг забруднення за концентрацією

частинок фітопланктону. *V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 23–26 вересня 2015 р.). Вінниця, 2015. С. 247.
54. Petruk V., Kvaterniuk S., Pohrebennyk V., Bezusiak Ya. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton. *New Trends in Ecological and Biological Research* : proc. of the intern. conf. (Presov, Slovak Republic, 9–11 September, 2015). Presov. 2015. P. 92.
55. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Кватернюк О. Є. Контроль екологічного стану водних об'єктів за характеристиками макрофітів на основі цифрової колориметрії та мультиспектральних зображень. *Наука. Молодь. Екологія* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф в рамках І Всеукраїнського молодіжного з'їзду екологів з міжнародною участю. (м. Житомир, 21–23 травня 2014 р.). Житомир, 2014. С. 160–163.
56. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Петрова О. А. Методи та засоби контролю оптичних параметрів природних середовищ на основі мультиспектральних зображень. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 3-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 17–19 вересня 2014 р.). Львів, 2014. С. 44.
57. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Васильківський І. В., Козак Я. Л. Оптичні засоби та методи контролю концентрації фітопланктону у водних об'єктах. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 3-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 17–19 вересня 2014 р.). Львів, 2014. С. 45.
58. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Гончарук В. В., Гриник Л. І. Екологічний контроль забруднення р. Згар біогенними та токсичними речовинами методами біоіндикації по фітопланктону. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 3-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 17–19 вересня 2014 р.). Львів, 2014. С. 46.
59. Петрук В. Г., Іщенко В. А., Кватернюк С. М., Майка Л. М. Дослідження впливу хімічних сполук у складі косметичних миючих засобів на довкілля методом біоіндикації по фітопланктону. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 3-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 17–19 вересня 2014 р.). Львів, 2014. С. 29.
60. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Києнко-Романюк Є. С., Бучинський С. А. Засоби телевізійного вимірювального контролю забруднення водних середовищ. *Приладобудування: ста* Контроль забруднення водних середовищ у видимому та ближньому ІЧ діапазоні *н і перспективи* : тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 23-24 квітня 2013 р.). Київ, 2013. С. 162–163.
61. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Васильківський І. В., Цимбалюк В. А. Контроль якості питної води м. Вінниці за вмістом нітратів. *IV-ий*

Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю : зб. наук. стат. (м. Вінниця, 25–27 вересня 2013 р.). Вінниця, 2013. С. 512–513.
62. Петрук В. Г., Кватернюк С.М., Васильківський І.В. та ін. Контроль забруднення екосистеми р. Снивода за характеристиками макрофітів. *IV-ий Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. стат. (м. Вінниця, 25–27 вересня 2013 р.). Вінниця, 2013. С. 513–515.
63. Петрук В., Кватернюк С., Лука А., Юрченко Ю. Підвищення точності вимірювань спектрів дифузного відбивання природних полідисперсних середовищ. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–2013)* : зб. тез доп. ІІ-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 29–30 жовтня 2013 р.). Вінниця, 2013. С. 28–29.
64. Петрук В., Кватернюк С., Васильківський І. та ін. Контроль забруднення водних об'єктів біогенними сполуками на основі дослідження фітопланктону. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–2013)* : зб. тез доп. ІІ-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 29–30 жовтня 2013 р.). Вінниця, 2013. С. 30.
65. Цимбалюк В. А., Денисюк Ю. М., Кватернюк С. М. Контроль якості питної води у м. Вінниця за допомогою традиційних методів та біоіндикації. *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів* : зб. тез доп. XXIII-ої всеукраїнської наук. конф. асп. і студ. (м. Донецьк, 16–18 квітня 2013 р.). Донецьк, 2013. С. 80–81.
66. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Сидорчук Ю. Ю. Контроль концентрації фітопланктону у фотобіореакторах. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 2-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 19–22 вересня 2012 р.). Львів, 2012. С. 46.
67. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Васильківський І. В., Слободиський А. П. Контроль забруднення водних середовищ у видимому та ближньому ІЧ діапазоні. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)* : матеріали XI міжнар. конф. (м. Вінниця, 9–11 вересня 2012 р.). Вінниця, 2012. С. 120–121.
68. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Барун В. В. и др. Оптический контроль содержания загрязняющих веществ в водных средах на основе метода биоиндикации по фитопланктону. *Медэлектроника–2012: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии* : тезисы докладов VII междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, Республика Беларусь, 13–14 декабря 2012 р.). Минск, 2012. С. 80–81.
69. Петрук В. Г., Моканюк О. І., Кватернюк С. М. та ін. Цифрова колориметрія приповерхневого прошарку полідисперсних природних середовищ. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Миколаїв, 8–12 червня 2012 р.). Миколаїв, 2012. С. 176–177.
70. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Вишневська Я. Ю. та ін. Методика оцінювання токсичності стічних вод за допомогою біоіндикації по

фітопланктону. *ІІІ-ій Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. ст. (м. Вінниця, 21–24 вересня 2011 р.). Вінниця, 2011. Том 2. С. 373–377.
71. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Васильківський І. В. та ін. Контроль інтегрального рівня забруднення р. Південний Буг за характеристиками макрофітів. *ІІІ-ій Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. ст. (м. Вінниця, 21–24 вересня 2011 р.). Вінниця, 2011. Том 2. С. 377–380.
72. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Кватернюк О. Є. Контроль інтегрального рівня токсичності стічних вод за допомогою біоіндикації по фітопланктону. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–2011)* : зб. тез. доп. І-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 18–20 жовтня 2011 р.). Вінниця, 2011. С. 211.
73. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Дубчак О. В. та ін. Вдосконалення засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ. *Приладобудування: стан і перспективи* : тези доп. XVI міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 16–17 квітня 2017 р.). Київ, 2017. С. 109–110.
74. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Дубчак О. В. та ін. Математичне моделювання оптичних характеристик неоднорідних біологічних середовищ. *Приладобудування: стан і перспективи* : тези доп. XVI міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 16–17 квітня 2017 р.). Київ, 2017. С. 30–31.
75. Кватернюк С. М., Варушечкіна М. В., Мандебура С. В., Козачук А. Ю. Опосередковані мультиспектральні вимірювання біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–*2017*)* : зб. тез. доп. IV-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 241.
76. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Варушечкіна М. В. та ін. Мультиспектральний контроль інтегральних параметрів забруднення стічних вод з використанням вищих водних рослин. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–*2017*)* : зб. тез. доп. IV-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 242.
77. Кватернюк С. М., Варушечкіна М. В., Мандебура С. В., Козачук А. Ю. Мультиспектральний телевізійний контроль середніх розмірів частинок у неоднорідних біологічних середовищах. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–*2017*)* : зб. тез. доп. IV-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 243.
78. Кватернюк С. М., Кватернюк О. Є., Варушечкіна М. В. та ін. Сегментація мультиспектральних зображень пошкоджених ділянок неоднорідних біологічних середовищ. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних*

системах (ВКДТС–2017*)* : зб. тез. доп. IV-ої міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 245.

79. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Вплив температури та освітлення на первинну продукцію фітопланктону на прикладі екосистеми річки Дохни. *VI-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 20–22 вересня 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 49.

80. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Визначення видової різноманітності фітопланктону. *VI-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 20–22 вересня 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 129.

81. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль параметрів біореактора для вирощування хлорели. *VI-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 20–22 вересня 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 168.

82. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безусяк Я. І. Дослідження екологічного впливу пестицидних препаратів на фітопланктон. *VI-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 20–22 вересня 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 192.

83. Безусяк Я. І., Кватернюк С. М. Обґрунтування заходів екологічної безпеки та впливу небезпечних відходів на водні об'єкти методом біоіндикації по фітопланктону. *Екологія* : матеріали наук.-практ. конф. всеукр. конкурсу студ. наук. робіт. (м. Полтава, 28–30 березня 2018 р.). Полтава, 2018. С. 7.

84. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Варакса В. В. Методи та засоби мультиспектрального екологічного контролю забруднення водних середовищ. *Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 5-го міжнар. конгресу. (м. Львів, 26–29 вересня 2018 р.). Львів, 2018. С. 21.

85. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Мандебура А. Ю., Мандебура С. В. Мультиспектральний вимірювальний контроль параметрів природних водних об'єктів для забезпечення їх екологічної безпеки. *Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС-2018»* : тез доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 2 – 4 жовтня 2018 р.). Вінниця, 2018. С . 192-193.

86. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Мандебура А. Ю., Мандебура С. В. Розв'язок прямої та оберненої задачі для мультиспектральних вимірювань параметрів природних водних середовищ. *Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС-2018»* : тез доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 2 – 4 жовтня 2018 р.). Вінниця, 2018. С . 194-195.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:
IV. Патенти:

87. Петрук В.Г., Кватернюк С. М., Кватернюк О. Є., Петрук Р. В. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного

стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону: пат. 99580 Україна. № 201500058; заявл. 05.01.2015; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11. 5 с.
88. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Васильківський І. В. та ін. Пристрій для контролю концентрацій частинок у полідисперсних водних середовищах: пат. 74380 Україна. № 201204439; заявл. 09.04.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20. 6 с.
89. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Бондарчук О. В. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю забруднення водних об'єктів за допомогою ряски малої (Lemna minor L.): пат. 117336 Україна. № 201613426; заявл. 27.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 6 с.
90. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Кватернюк О. Є. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювання біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ: пат. 124253 Україна. № 201711352; заявл. 20.11.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6. 12 с.
91. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Кватернюк О. Є. Комплекс для очищення стічних вод та мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю інтегральних параметрів забруднення з використанням вищих водних рослин: пат. 124230 Україна. № 201711020; заявл. 10.11.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6. 5 с.
92. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Кватернюк О. Є. Спосіб мультиспектрального телевізійного контролю розмірів розсіювальних частинок у неоднорідних біологічних середовищах: пат. 124914 Україна. № 201711325; заявл. 20.11.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. 7 с.

V. Статті у наукових виданнях України:

93. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Гайдей Ю. А. Контроль інтегральних параметрів якості поверхневих вод р. Південний Буг за характеристиками макрофітів. *Екологічні науки*. 2012. № 1. С. 65–70.

АНОТАЦІЯ

Кватернюк С.М. **Розвиток наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, 2019.

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, які спрямовані на розвиток наукових основ мультиспектральних методів та технічних засобів контролю екологічного стану водних об'єктів, які враховують вплив їх характеристик на ефективність контролю екологічного стану водних об'єктів, що є підґрунтям ефективного управління їх екологічною безпекою.

Розроблено метод мультиспектрального контролю екотоксичності з використанням опосередкованого вимірювання концентрації частинок мікроводоростей. Крім того, запропоновано метод мультиспектрального контролю забруднення поверхневих вод, що полягає у визначенні відносних розмірів сегментів поверхні водного середовища з вищими водними рослинами, які мають морфологічні зміни. За результатами моделювання світлорозсіювання у водному середовищі досліджено відносний внесок його шарів на загальний коефіцієнт дифузного відбиття. Удосконалено мультиспектральні методи оцінювання екологічного стану водних об'єктів за фітопланктоном. Також вдосконалена математична модель процесу поширення випромінювання у водних середовищах з вищими водними рослинами, яка враховує ефект локалізованого поглинання. Вдосконалено метод мультиспектрального контролю забруднення стічних вод з використанням вищих водних рослин у очисному комплексі. Розроблено технічні засоби мультиспектрального контролю параметрів забруднення водних середовищ та екологічного стану водних об'єктів, а також їх програмне забезпечення. Обґрунтовано оптимальну кількість спектральних каналів та їх параметри для засобів мультиспектрального контролю. Розроблено науково-методичні рекомендації щодо реалізації запропонованих наукових основ використання мультиспектральних методів та засобів екологічного контролю.

Ключові слова: екологічна безпека, технічні засоби контролю, водні середовища, водний об'єкт, мультиспектральний контроль, спектральні характеристики, фітопланктон, біомаса, достовірність.

АННОТАЦИЯ

Кватернюк С.М. **Развитие научных основ мультиспектральных методов и технических средств контроля экологического состояния водных объектов.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. – Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев, 2019.

В диссертационной работе изложены результаты исследований, направленных на развитие научных основ мультиспектральных методов и технических средств контроля экологического состояния водных объектов, которые учитывают влияние их характеристик на эффективность контроля экологического состояния водных объектов, что является основой эффективного управления их экологической безопасностью.

Разработан метод мультиспектрального контроля экотоксичности, как интегрального показателя загрязнения поверхностных вод с использованием косвенного измерения концентрации частиц микроводорослей с обработкой результатов с применением нейросети и нейро-нечеткой сети. Предложен метод мультиспектрального контроля загрязнения поверхностных вод водных объектов, сущность которого заключается в определении относительных

размеров сегментов поверхности водной среды с высшими водными растениями, которые имеют морфологические изменения по результатам анализа мультиспектральных изображений. По результатам моделирования процесса светорассеяния в слоях водной среды с фитопланктоном обнаружено относительный вклад отдельных слоев в общий коэффициент диффузного отражения. Усовершенствован метод оценки экологического состояния водных объектов, предусматривающий применение мультиспектрального определения видового состава фитопланктона. Усовершенствован метод оценки экологического состояния водных объектов, состоящий в косвенном мультиспектральном измерении биомассы и соотношения пигментных параметров в приповерхностном слое водных объектов с использованием регрессионных уравнений. Усовершенствована математическая модель процесса распространения излучения в водных средах с высшими водными растениями, которая учитывает эффект локализованного поглощения. Получил дальнейшего развитие метод мультиспектрального контроля интегральных параметров загрязнения сточных вод с использованием высших водных растений в очистительном комплексе.

Научно обоснованы схемные решения и разработаны технические средства мультиспектрального экологического контроля параметров загрязнения водных сред и экологического состояния водных объектов на основе косвенного измерения биомассы фитопланктона и высших водных растений, а также соотношения между их основными пигментами. Научно обосновано оптимальное количество спектральных каналов и их параметры для технических средств мультиспектрального контроля с помощью пошаговой множественной регрессии с включением независимых переменных, что позволяет обеспечить необходимую точность косвенного измерения и достаточную достоверность контроля параметров загрязнения водных сред и экологического состояния водных объектов. В результате решения обратной задачи определения биомассы и соотношения между пигментными параметрами в водных средах по их мультиспектральным изображениям получены регрессионные уравнения, позволяющие косвенно измерять эти параметры в технических средствах экологического контроля. Для разработанных опытных образцов технических средств мультиспектрального экологического контроля параметров загрязнения водных сред оценена достоверность контроля, что определяется погрешностями в измерительных каналах, а также зависит от выбранных рабочих длин волн спектральных каналов, их диапазона и количества. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение технических средств мультиспектрального экологического контроля параметров загрязнения водных сред и экологического состояния водных объектов. Разработаны научно-методические рекомендации по реализации предложенных научных основ использования мультиспектральных методов и технических средств экологического контроля, которые учитывают влияние их метрологических характеристик и параметров на эффективность процесса контроля параметров загрязнения водных сред и

экологического состояния водных объектов в системе управления их экологической безопасностью.

Ключевые слова: экологическая безопасность, технические средства контроля, водные среды, водный объект, мультиспектральный контроль, спектральные характеристики, фитопланктон, биомасса, достоверность.

ABSTRACT

Kvaterniuk S.M. **Development of scientific bases of multispectral methods and technical means of monitoring of the ecological state of water bodies.** – Qualifying scientific work on the manuscript right.

Thesis for a Doctor of Technical Sciences Degree in specialty 21.06.01 – ecological safety. State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, 2019.

This thesis presents the results of research aimed at the development of scientific foundations of multispectral methods and technical means of monitoring the ecological status of water bodies, which take into account the influence of their characteristics on the effectiveness of monitoring the ecological status of water bodies, which is the basis for the effective management of their environmental safety.

The method of multispectral ecotoxicity control using indirect measurement of the concentration of microalgae particles has been developed. A method of multispectral control of pollution of surface waters is proposed, which consists in determining the relative sizes of segments of the surface of the aquatic environment with higher aquatic plants that have morphological changes. According to the results of modeling of light scattering in an aqueous medium, the relative contribution of its layers to the total diffuse reflectance was investigated. Improved multispectral methods for assessing the ecological status of water bodies using phytoplankton. The mathematical model of the process of radiation propagation in aquatic environments with higher aquatic plants, which takes into account the effect of localized absorption, has been improved. The method of multispectral control of pollution of sewage using higher aquatic plants in the treatment complex has been improved. Technical means of multispectral monitoring of parameters of water pollution and the ecological state of water bodies, as well as their software, have been developed. The optimal number of spectral channels and their parameters for means of multispectral monitoring are substantiated. Scientific and methodological recommendations for the implementation of the proposed scientific basis for the use of multispectral methods and environmental monitoring tools have been developed.

Key words: environmental safety, technical means of control, water environments, water body, multispectral control, spectral characteristics, phytoplankton, biomass, reliability.