

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук

**СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ
КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦІЙ
ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНИХ
ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 504.064.38

ББК 26.222

К86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол №4 від 24.11.2011 р.).

Рецензенти:

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

В. А. Порєв, доктор технічних наук, професор

В. Г. Кур'ята, доктор біологічних наук, професор

Кватернюк, С. М.

К86

Спектрополяриметричний контроль концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ / С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 156 с.

ISBN 978-966-641-495-6

В монографії досліджено можливості підвищення вірогідності контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ. Вдосконалено математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю, що дозволило врахувати особливості форми і внутрішньої структури частинок. Запропоновано спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок, що дає можливість більш точно розпізнавати частинки певного типу та визначати їх концентрацію. Розроблено автоматизований засіб контролю на основі спектрополяриметричного методу, проаналізовано його похибки та метрологічні характеристики.

УДК 504.064.38

ББК 26.222

ISBN 978-966-641-495-6

© С. Кватернюк, В. Петрук, 2012

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Вступ	6
Розділ 1. Аналіз сучасних методів та засобів контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ	7
1.1. Аналіз особливостей ПВС як об'єктів контролю	7
1.2. Аналіз експериментальних методів контролю концентрацій частинок ПВС	14
1.3. Аналіз структурних схем засобів контролю концентрацій частинок ПВС	19
1.4. Аналіз теоретичних методів розв'язання прямої і зворотної задач теорії перенесення поляризованого випромінювання у ПВС	26
1.5. Аналіз сучасних промислових засобів контролю концентрацій частинок ПВС	29
1.6. Висновки та обґрунтування напрямку досліджень	32
Розділ 2. Розроблення математичних моделей перенесення випромінювання об'єктом контролю та первинним вимірювальним перетворювачем	34
2.1. Розроблення математичних моделей перенесення випромінювання однорідними частинками ПВС	34
2.1.1. Математичне моделювання перенесення випромінювання сферичними частинками	34
2.1.2. Математична модель перенесення випромінювання завислими частинками складної форми	37
2.2. Розроблення математичних моделей перенесення випромінювання дисперсними частинками складної структури	47
2.2.1. Математична модель перенесення випромінювання в рамках наближення Релея–Ганса–Дебая для частинок ПВС складної структури	48
2.2.2. Математична модель перенесення випромінювання на основі методу Монте-Карло та гібридної апроксимації	52
2.2.3. Моделювання спектрополяриметричних зображень на основі параметрів Стокса та матриці розсіювання	56
2.3. Розроблення математичної моделі оптичного первинного перетворювача засобу контролю концентрацій частинок ПВС ...	58
2.4. Висновки	64
Розділ 3. Спектрополяриметричний метод та метрологічні характеристики автоматизованого засобу контролю концентрацій частинок	66

3.1. Розроблення спектрополяриметричного методу контролю концентрацій частинок ПВС	66
3.2. Розроблення структурних схем засобів контролю концентрацій частинок ПВС	68
3.3. Дослідження рівняння перетворення оптичного сигналу	75
3.4. Аналіз порога чутливості засобу контролю	80
3.5. Аналіз похибок засобу контролю	82
3.5.1. Аналіз інструментальних похибок	82
3.5.2. Аналіз методичної та загальної похибки визначення концентрацій частинок ПВС	89
3.6. Дослідження дії факторів впливу на перетворення інформативного сигналу у засобі контролю	91
3.7. Висновки	97
Розділ 4. Аналіз експериментальних результатів та оцінка вірогідності контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ	99
4.1. Алгоритмічне і програмне забезпечення засобу контролю концентрацій частинок ПВС за спектрополяриметричним методом	99
4.1.1. Виділення необхідного фрагмента та фільтрація зображень частинок	102
4.1.2. Підвищення контрасту зображення частинок	105
4.1.3. Морфологічний аналіз зображень	107
4.1.4. Визначення розмірів частинок ПВС та їх статистичний аналіз	109
4.1.5. Розпізнавання частинок ПВС на основі порівняння з характерними зображеннями для частинок певного типу	111
4.1.6. Обґрунтування вибору мінімально можливої кількості спектрополяриметричних зображень	120
4.2. Аналіз експериментальних результатів контролю концентрацій частинок ПВС	122
4.3. Оцінювання невизначеності вимірювань концентрацій частинок ПВС	129
4.4. Оцінювання вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС	133
4.5. Висновки	137
Загальні висновки	139
ЛІТЕРАТУРА	141

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
- ВОХ – волоконно-оптичний хвилевід
- ОК – об'єкт контролю
- ОПП – оптичний первинний перетворювач
- ПВС – полідисперсні водні середовища
- ПЗЗ – пристрій з зарядовим зв'язком
- СПК – світлоподільний куб
- СПЦ – скануюча проточна цитометрія
- ФЕП – фотоелектронний помножувач

ВСТУП

Теоретичні та практичні аспекти автоматизованого контролю параметрів водних об'єктів та навколишнього природного середовища в цілому розвинуті недостатньо, а інтегральні показники, за якими оцінюється їх стан, у значній мірі є відносними і суб'єктивними. При цьому відомі методи і засоби контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ (ПВС) не забезпечують високу вірогідність контролю, оскільки не дозволяють у повній мірі порівняти оптико-фізичні параметри частинок різних типів, що визначаються геометричними розмірами, формою, внутрішньою будовою, анізотропністю, спектральними і поляризаційними властивостями. А це, у свою чергу, призводить до неможливості точного розпізнавання частинок ПВС певних типів, зокрема, частинок фітопланктону, визначення та контролю їх концентрацій, що суттєво ускладнює адекватну оцінку рівня забруднення водних об'єктів. Отже, для підвищення вірогідності контролю виникає необхідність розроблення нового спектрополяриметричного методу та автоматизованого засобу контролю, які б дозволили більш точно визначати концентрацію частинок певного типу у ПВС, а, відповідно, оцінювати стан забруднення водних об'єктів та якість поверхневих вод.

Крім того, вони можуть знайти своє застосування і у інших напрямках екологічного моніторингу довкілля, санітарно-гігієнічній експертизі, харчовій промисловості, аналізі гуморальних середовищ, екотрофологічних дослідженнях, а також в оптиці розсіювання, теорії переносу випромінювання та у контрольно-вимірвальній техніці в цілому.

Актуальність теми обумовлена необхідністю постійного підвищення вірогідності контролю концентрацій частинок певних типів у полідисперсних водних середовищах з урахуванням їх оптико-фізичних параметрів та розроблення нового спектрополяриметричного методу і відповідного автоматизованого засобу контролю з метою забезпечення зростаючих вимог до якості поверхневих вод.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

1.1 Аналіз особливостей ПВС як об'єктів контролю

Забруднення водних об'єктів полягає у внесенні прямо чи побічно у водне середовище речовини або енергії, що приводить до зміни функціонування водних екосистем, потоків енергії і речовин, продуктивності та чисельності біологічних популяцій тощо. Це призводить до зміни властивостей водного об'єкта, виникнення небезпеки для живих ресурсів екосистеми та здоров'я людини [1].

Для екологічної оцінки якості поверхневих вод в Україні використовується Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями [2, 3], що встановлює три групи спеціалізованих класифікацій, а саме:

- за критеріями сольового складу;
- за трофо-сапробіологічними (еколого-санітарними) критеріями;
- за критеріями вмісту специфічних речовин токсичної та радіаційної дії, а також за рівнем токсичності.

При забрудненні водних об'єктів до них можуть надходити і накопичуватись як стійкі забруднюючі речовини, які практично не руйнуються у природних умовах (наприклад, ДДТ) так і речовини, що мають природні механізми засвоєння (нітрати, нітроти, фосфати) в кількостях, що порушують баланс водних екосистем та їх здатність до саморегуляції. Загалом, у водні об'єкти потрапляють тисячі шкідливих речовин, що суттєво ускладнює контроль їх екологічного стану. Оцінка стану природних водних об'єктів з використанням гранично допустимої концентрації (ГДК) є невиправданою, оскільки оцінити комплексний вплив тисяч хімічних забрудників на складну багатовидову екосистему, визначивши їх концентрації, неможливо [4]. Для вирішення цієї проблеми використовують методи біоіндикації водних об'єктів, що дозволяють інтегрально оцінити їх забруднення широким класом хімічних речовин, а також вплив інших антропогенних факторів [5, 6]. Існуючі методики дозволяють оцінити еколого-санітарний стан водних об'єктів, а також рівень токсичності за допомогою біоін-

дикації [7–32]. Зокрема, у Єдиному міжвідомчому керівництві по організації та здійсненню державного моніторингу вод [18] біотестування вказане як один з обов'язкових методів аналізу токсичності поверхневих вод. Будь-яка комбінація традиційних аналітичних приладів не в змозі передбачити специфічний біологічний ефект, виявлений в процесі контролю токсичності як інтегральний показник. Основний принцип гідробіологічного тестування водних об'єктів полягає у порівнянні виживання певних організмів у чистій та забрудненій воді [6]. У добре збалансованій екосистемі є велика кількість видів, причому жоден з них не домінує. Зі зростанням забруднення екосистема спрощується, залишаються стійкі до забруднення види. У нашій роботі виберемо у якості тест-організмів фітопланктон, що дозволить аналізувати клас якості води, сапробність та трофічний рівень для широкого діапазону категорій поверхневих вод від чистих до дуже брудних, а також оцінювати рівень їх токсичності. Процедура біоіндикації забруднення водних об'єктів за допомогою фітопланктону зводиться до контролю концентрацій частинок фітопланктону різних видів.

При цьому середовища водних об'єктів, які підлягають дослідженню, розглядаються як полідисперсні водні середовища (ПВС) – складні полідисперсні системи, що включають в себе частинки різних типів, розмірів і форми, які перебувають у складній взаємодії. До ПВС, які є об'єктом контролю автори, відносять природні полідисперсні водні середовища водних об'єктів. У ПВС знаходяться у завислому стані частинки різного походження: неорганічна завесь, колоїдні органічні частинки, а також частинки планктону різних типів. Основним параметром ПВС, як об'єкта контролю, є чисельні концентрації частинок різних типів, що визначаються кількістю частинок певної групи N_{zi} у заданому об'ємі V

$$C_{zi} = \frac{N_{zi}}{V}. \quad (1.1)$$

Крім того, у низці випадків необхідно контролювати не лише концентрації частинок певних типів, але й також співвідношення між ними, що характеризує стан ПВС у межах норми та дозволяє його прогнозувати. Для визначення концентрації частинок певних типів необхідно спочатку здійснити їх розрізнення на основі порівняння оптико-фізичних параметрів. Частинки ПВС, які використовуються у

якості біоіндикаторів забруднення, є біологічними клітинами та їх агрегатами. Забруднення водних об'єктів призводить до зміни видового складу водних екосистем та їх гідробіологічних показників. У порівнянні із фізичними та хімічними показниками якості води гідробіологічні – є більш чутливими до забруднень, оскільки навіть невеликі забруднення водних об'єктів призводять до значних змін у чисельності деяких видів фітопланктону, що використовується у якості біоіндикатора. Контроль решти параметрів ПВС (фізичних, хімічних, бактеріологічних) не входить до кола питань, що будуть досліджуватись у монографії.

Контроль стану природних ПВС можливо здійснювати на основі індексів біоіндикації по фітопланктону [7–9]. Функціональна роль фітопланктону у екосистемі – первинна ланка перетворення потоку сонячної енергії, продуцент автохтонної органічної речовини, важливий агент самоочищення і фотосинтетичної аерації води. Фітопланктон є одним із біоіндикаторів екологічного статусу водних об'єктів відповідно до Водної Рамкової Директиви (WFD) ЄС 2000/60 [33], а також систем біоіндикації стану водних об'єктів США Rapid Bioassessment Protocols (RPBs) та Великобританії River Invertebrate Prediction and Classification System (RIVPACS) [10, 11]. Класифікація організмів фітопланктону [34] за розмірами наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація частинок фітопланктону

Розмір	Тип фітопланктону
до 5 мкм	пікопланктон (бактерії та синьо-зелені водорості)
від 5 до 50 мкм	нанопланктон (основний фітопланктон)
від 50 мкм до 1 мм	мікропланктон

Фітопланктонні водорості переважно одноклітинні, хоча серед них є багато колоніальних та нитчастих форм, особливо у прісноводних водоймах. Поділ водоростей на системні відділи в основному збігається з характером їх забарвлення та особливостями будови. У прісноводних об'єктах спостерігаються водорості таких відділів [35, 36]: синьо-зелені (Cyanoprocarota); золотисті (Chrysophyta); жовто-зелені (Xanthophyta); криптофітові (Cryptophyta); динофітові (Dinophyta); ев-

гленові (Euglenophyta); діатомові (Bacillarophyta); зелені (Chlorophyta); стрептофітові (Streptophyta).

Синьо-зелені водорості (або ціанобактерії) значно відрізняються від інших водоростей простою внутрішньою будовою клітин. Клітини цих водоростей не мають сформованого ядра, що наближує їх до бактерій. Разом з бактеріями синьо-зелені водорості складають розділ організмів, відомий як прокаріоти (Prokaryota), на відміну від решти організмів клітини яких мають сформоване ядро і відомих як еукаріоти (Eukaryota). Зображення частинок фітопланктону прісноводних водойм наведено на рис. 1.1.

Суанпрокаріоти (синьо-зелені водорості)



Oscillatoria



Coleosphaerium



Chroococcus

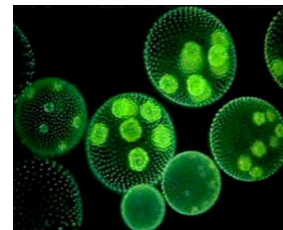
Chlorophyta (зелені)



Netrium

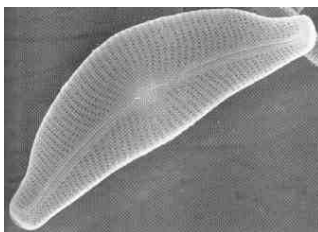


Spinoclosterium

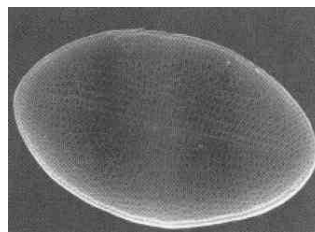


Volvox

Bacillarophyta (діатомові)



Symbella tumida



Cocconeisplacentula



Diatoms

Рисунок 1.1 – Основні групи фітопланктону прісноводних водойм

Клітини водоростей-еукаріотів мають складну будову, в їх складі (за винятком синьо-зелених водоростей) є особливі внутрішньоклітинні утворення – хлоропласти, що складаються з білків, ліпідів, нуклеїнових кислот та пігментів. У синьо-зелених водоростей є пігментовмісні ламелли-тілакоїди, що пронизують усю клітину, але найбільшу концентрацію мають біля поверхні. Структура хлоропластів, що є центрами фотосинтезу у клітині, залежить від конкретного організму. Основним пігментом, який присутній у хлоропластах чи аналогічних структурах всіх фотосинтезуючих організмів, є хлорофіл *a* (характеристичні довжини хвиль $\lambda = 430$ нм, 663 нм). Зелені водорості містять хлорофіл *b* ($\lambda = 435$ нм, 645 нм). Діатомові та динофітові водорості містять хлорофіл *c* ($\lambda = 440$ нм, 583 нм, 634 нм). У червоних водоростях міститься хлорофіл *d*. Окрім хлорофілів, у хлоропластах завжди наявні каротиноїди, вміст яких оцінюється по еквіваленту β -каротину (480 нм). Синьо-зелені та червоні водорості містять два типи фікобілінів (фікоціанин і фікоеритрин) у різних співвідношеннях. Вибір характеристичних довжин хвиль для дослідження зразків фітопланктону водних об'єктів [8] визначається спектральними залежностями відносних показників поглинання пігментів фітопланктону (рис. 1.2). Від складу пігментів залежать й спектральні характеристики поглинання світла фітопланктоном різних видів. На рис. 1.3 наведені спектральні залежності відносних показників поглинання для трьох основних відділів фітопланктону [36].

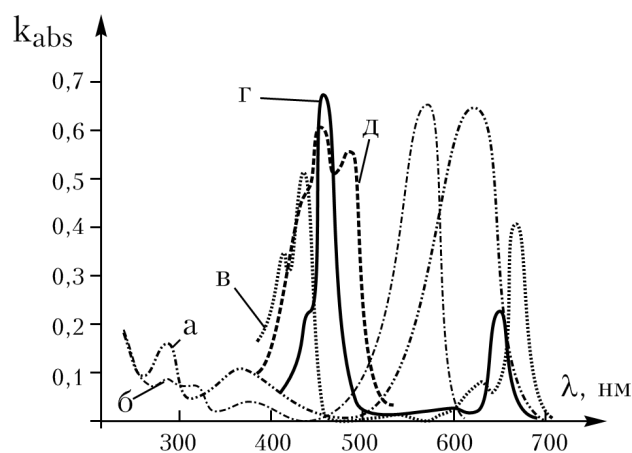


Рисунок 1.2 – Спектральні залежності відносних показників поглинання пігментів фітопланктону: а – фікоціанин, б – фікоеритрин, в – хлорофіл *a*, г – хлорофіл *b*, д – бетакаротин

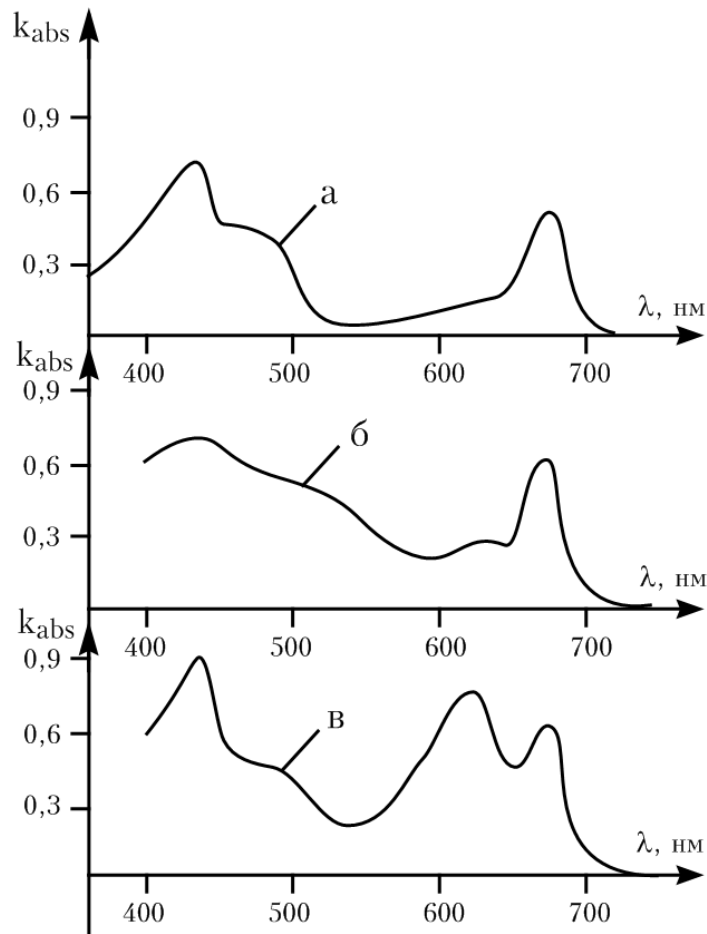


Рисунок 1.3 – Спектральні залежності відносних показників поглинання різних груп фітопланктону: а – зелених, б – діатомових^X, в – синьо-зелених водоростей (in vivo)

Типова спектрофотометрична методика розрахунку концентрації основних пігментів з використанням стандартних формул, рекомендованих робочою групою при ЮНЕСКО [8]:

$$C_{Chla} = (11,64 \cdot E'_{663} - 2,16 \cdot E'_{645} - 0,1 \cdot E'_{630}) \frac{V_1}{V_2}, \quad (1.2)$$

$$C_{Chlb} = (-3,94 \cdot E'_{663} + 20,97 \cdot E'_{645} - 3,66 \cdot E'_{630}) \frac{V_1}{V_2}, \quad (1.3)$$

$$C_{Chlc} = (-5,53 \cdot E'_{663} - 14,81 \cdot E'_{645} - 54,22 \cdot E'_{630}) \frac{V_1}{V_2}, \quad (1.4)$$

де V_1 – об'єм екстракту (мл); V_2 – об'єм проби (дм³); E'_{630} , E'_{645} , E'_{663} – оптична щільність при довжині хвилі відповідно 630, 645, 663 нм, віднесена до довжини кювети l (1 см):

$$E'_{630} = \frac{E_{630} - E_{750}}{l}; E'_{645} = \frac{E_{645} - E_{750}}{l}; E'_{663} = \frac{E_{663} - E_{750}}{l}. \quad (1.5)$$

Діапазон розмірів частинок основного фітопланктону складає до 50 мкм. Однак розміри колоніальних видів, наприклад, *Volvox*, *Pyrrophyta*, досягають 500 мкм. Найменша фракція фітопланктону – пікопланктон з розмірами від 0,2 до 2 мкм довгий час не досліджувалась детально. Однак у останній час встановлено, що ця група фітопланктону може складати значну частину загальної біомаси та бути основним продуцентом органічної речовини. Розміри клітин фітопланктону важливі з оптичної точки зору, оскільки клітини різних розмірів мають різні спектральні та кутові характеристики світлорозсіювання. Крім того, при оцінці біомаси водоростей по вмісту хлорофілу *a* слід враховувати, що клітини різних розмірів мають різний вміст цього пігменту на одиницю їх біомаси та, відповідно, і різне поглинання ними світла.

Значення концентрації частинок фітопланктону у водних об'єктах мають значну просторову та часову варіацію. Для повного дослідження водного об'єкта необхідно проаналізувати тисячі проб та скласти характеристики концентрацій частинок різних видів фітопланктону в залежності від часу в масштабі сезонних річних змін, а також в залежності від глибини, поперечного перерізу та вздовж всієї протяжності водного об'єкта. Обробка результатів традиційними у гідробіології методами надзвичайно трудомістка, а також забезпечує недостатню вірогідність та швидкодію контролю. Один дослідник, при використанні візуальної мікроскопії та атласа-визначника, може проаналізувати концентрацію частинок різних видів фітопланктону у двох-трьох пробах за день [37]. Відповідно на обробку всіх проб, взятих з водного об'єкта у заданий час необхідно роки, а протягом часу витраченого на обробку інформації концентрації частинок багатократно зміняться, а результати досліджень втратять свою актуальність та матимуть лише ретроспективне значення. Для оцінки антропогенних впливів на водний об'єкт, а також для отримання оперативної інформації про стан екосистеми необхідні нові методи досліджень, які б дозволяли оперативно оцінювати рівень забруднення, а також автоматизовано здійснювати обробку зібраних матеріалів.

1.2 Аналіз експериментальних методів контролю концентрацій частинок ПВС

Існує низка експериментальних методів вимірювального контролю концентрацій частинок ПВС [6, 38]. У лабораторній практиці широко використовують електрохімічні методи вимірювання параметрів частинок – кондуктометричний та електрокінетичний, у яких за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів фізичні характеристики частинок (геометричні розміри, форма, внутрішня будова) зводяться до вимірювання значення опору чи різниці потенціалів, що пов'язаний з ними. Це дозволяє суттєво спростити засоби контролю, однак не дає у повній мірі визначати параметри частинок, зокрема, їх концентрацію.

Кондуктометричний метод заснований на вимірюванні електричного опору середовища на частотах 10–25 кГц. Електричний опір окремих частинок у проточних приладах вимірюється за допомогою комірки Коултера [39, 40]. Однак, цей метод є недостатньо чутливим для надійного розпізнавання частинок фітопланктону різних видів.

У основу електрокінетичного методу покладено вимірювання різниці потенціалів, що виникає при наявності у рідині заряджених частинок (дзета-потенціал, ζ) чи осіданні частинок (седиментаційний потенціал за рахунок дії ефекту Дорна) [41, 42], однак цей метод не дозволяє розпізнати тип частинки.

Оптичні методи дозволяють визначати значно більшу кількість характеристик частинок ПВС. Проаналізуємо основні з них.

Фотометричний метод є найбільш поширеним лабораторним методом дослідження ПВС. За допомогою цього методу можлива кількісна оцінка розмірів і щільності мікроагрегатів. Окрім цього, фотометричний аналіз відрізняється простотою і доступністю, що пояснює його широке застосування в лабораторній практиці.

При використанні методу спектрофотометрії у якості зондуючого випромінювання використовується монохроматор зі змінною довжиною хвилі, що дозволяє вимірювати спектральні характеристики поглинання чи відбивання, а також аналізувати параметри на характеристичних довжинах хвиль, що відповідають за певні пігменти частинок [38, 43].

Послаблення інтенсивності світла, що пройшло через оптично мутне середовище контролюють, методом турбідиметрії [41].

Метод рефрактометрії полягає у вимірюванні показника заломлення середовища, що суттєво відрізняється для його дисперсних частинок та розчинів, у яких вони знаходяться.

Метод лазерної дифрактометрії, що заснований на явищі дифракції лазерного випромінювання на одиночних і множинних частинках ПВС, характеризується високою точністю, чутливістю, швидкодією, мінімальною дією на об'єкт дослідження, можливістю одночасної реєстрації великої кількості малих частинок. Параметри дифракційної картини (ДК) однозначно пов'язані з параметрами мікрооб'єктів, що дозволяє визначати їх розміри, форму, внутрішню структуру [44].

Однак такі оптичні методи дають інтегральні параметри, що характеризують ПВС загалом – середні розміри частинок, ступінь дисперсності, середню концентрацію частинок [38, 45] та не дозволяють досліджувати параметри окремих частинок, або їх типів чи груп. У реальних ПВС, що мають велику кількість різних частинок, такий підхід не дозволяє отримати співвідношення між концентраціями частинок різних груп, що визначає стан ПВС.

Раніше при дослідженнях нехтувався векторний характер випромінювання, що поширюється у ПВС, оскільки вважалось, що відбувається швидка деполяризація світла при його поширенні у таких середовищах. Проте у низці випадків ступінь поляризації цього світла виявляється цілком вимірюваним. При цьому інформативними параметрами, що характеризують структуру середовищ, є як ступінь деполяризації падаючого поляризованого світла, характер перетворення поляризації з одного виду в інший, так і поява поляризованої компоненти в розсіяному світлі при опроміненні об'єкта неполяризованим випромінюванням.

Найбільш повно пружне розсіювання світла окремими частинками чи ансамблями частинок описується за допомогою матриці розсіювання світла (МРС) – матриці Мюллера, кожний з елементів якої є функцією довжини хвилі, розміру, форми і внутрішньої будови частинок [46, 47]. Для вимірювання МРС використовують методи поляризаційної нефелометрії, тобто здійснюється вимірювання індикатрис розсіювання для всіх 16 елементів матриці Мюллера при відповідних положеннях поляризатора та аналізатора. Для дослідження ПВС ши-

роко використовується скануюча проточна цитометрія (СПЦ) [48–51], особливістю якої є дослідження частинок в тонкому потоці, створеному гідрофокусуною головкою. СПЦ дозволяє визначати розмір і показник заломлення одиночних часток у реальному часі без використання процедури калібрування. Основною перевагою такої технології аналізу одиночних часток є висока швидкість і універсальність технології. Недоліком є неможливість досліджувати частинки з великим діапазоном розмірів, а також утворення лінійних та сферичних комбінацій завислих частинок, що обмежується розмірами потоку створеного гідрофокусуною головкою, а також деформацією частинок складної форми у потоці.

Метод поляриметрії зображень (відеополяриметрії) для ПВС полягає у реєстрації ПЗЗ-камерою поляризаційного зображення для елементів матриці Мюллера, що утворене після проходження поляризованого лазерного випромінювання через кювету з ПВС чи відбивання від поверхні [52, 53]. При спектрополяриметрії зображень аналогічні вимірювання здійснюють на різних довжинах хвиль [54, 55], що дозволяє врахувати спектральні особливості пігментів дисперсних частинок ПВС. Такий метод є найбільш перспективним для подальших досліджень, оскільки дозволяє отримати оптико-фізичні параметри ПВС, які пов'язані з властивостями їх дисперсних частинок. Цей метод потребує подальшого вдосконалення відповідно до особливостей ПВС, як об'єктів контролю.

Для дослідження частинок ПВС широко застосовують методи мікроскопії. У світловому мікроскопі збільшення зображення досягається спеціальною системою лінз об'єктива та окуляра. Дзеркало, конденсор та діафрагма направляють світловий потік і регулюють освітлення об'єкта. У темнопольному мікроскопі використовується спеціальний конденсор, що виділяє контрастуючі структури матеріалу. При цьому об'єкт виглядає, як освітлений на темному фоні. Поляризаційна мікроскопія дозволяє формувати поляризаційні зображення анізотропних структур. Конфокальна мікроскопія дозволяє спостерігати об'єкти у фокусі по всьому полю та отримати чітке зображення, завдяки якому з'являється можливість просторової реконструкції досліджуваної частинки. Світлове випромінювання, що проходить через частинки ПВС, змінює не лише свою інтенсивність, але й фазу. І саме фазовий зсув несе основну інформації про структуру об'єкта. Інтер-

ференційна мікроскопія поєднує принципи фазового контрасту та поляризаційної мікроскопії. Для дослідження цих фазових зсувів, а також вивчення тривимірних зображень мікрооб'єктів використовують метод голографічної інтерференційної мікроскопії [56]. Об'ємне голографічне зображення дозволяє кількісно оцінити поперечний переріз частинки, площу її поверхні, об'єм, вагу та концентрацію речовин всередині. Кількісний аналіз частинок ПВС при візуальній мікроскопії здійснюють за допомогою лічильної камери Горяєва відповідно до методики [14]. Для автоматизованої обробки зображень частинок ПВС, отримання їх геометричних параметрів та розрізнення типів, використовують засоби нечіткої логіки та нейропроцесори [57, 58]. Методи мікроскопії можуть бути використані для подальшого дослідження та потребують вдосконалення для врахування світлорозсіювання у внутрішніх неоднорідностях завислих частинок ПВС, розміри яких співрозмірні з довжиною хвилі зондуючого випромінювання.

Новітнім напрямком досліджень параметрів ПВС є спекл-інтерферометрія, що полягає у отриманні спекл-зображення (від англ. speckle – пляма), яке утворюється внаслідок випадкової модуляції мікронеоднорідностями лінійно поляризованого лазерного випромінювання, що проходить через кювету з ПВС [59, 60], однак методи обробки спекл-зображень не дозволяють точно визначити параметри завислих частинок.

Флуориметричні методи дозволяють швидко і достовірно розділяти і підраховувати будь-які підтипи будь-яких типів частинок ПВС, що відомі фахівцям. Флуориметричний метод є одним з основних при визначенні концентрації хлорофілу у водному середовищі [6, 37, 43]. При люмінесцентній мікроскопії об'єкт освітлюється на одній довжині хвилі, а спостереження проводиться на іншій довжині хвилі, на якій відбувається флуоресценція. Розроблені спеціальні флуоресцентні барвники, які поєднуються зі специфічними макромолекулами на поверхні або всередині частинок ПВС і можуть використовуватись для вивчення їх структури в масштабі нанометрів. Однак використання флуоресцентних міток значно підвищує вартість та ускладнює процес досліджень і контролю. Відповідно до наведених класифікаційних ознак класифікація експериментальних оптичних методів контролю стану ПВС показана на рис. 1.4.

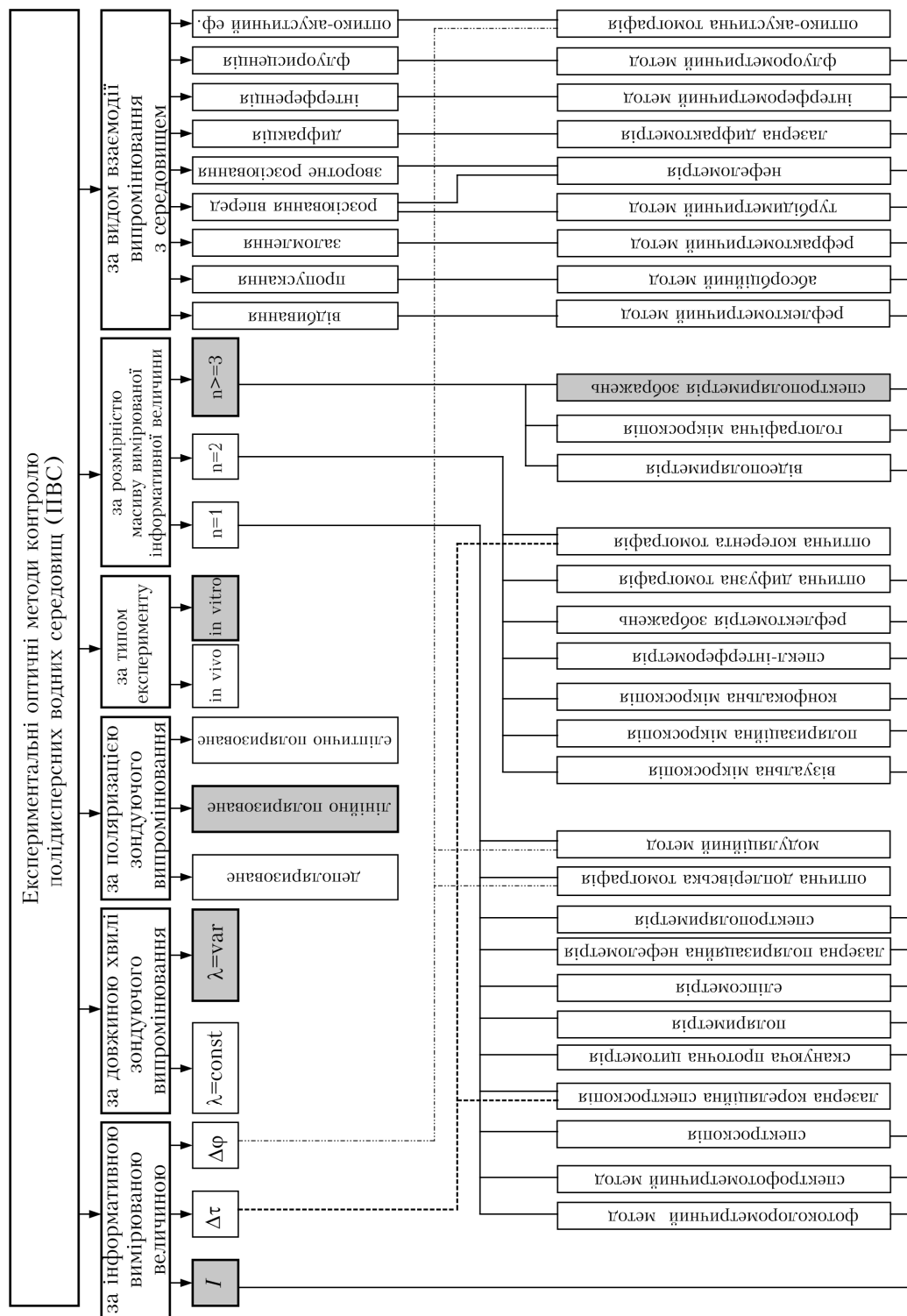


Рисунок 1.4 –Класифікація експериментальних оптичних методів контролю ПВС

При оптичному контролі ПВС можна використовувати різні режими роботи джерела зондуючого випромінювання [46, 61, 62]:

- неперервне джерело випромінювання, інформативним параметром є інтенсивність, режим найбільш поширений, оскільки дозволяє використовувати порівняно недорогі фотоприймальні та підсилювальні пристрої;

- надкороткі імпульси джерела випромінювання ($10^{-9} - 10^{-11}$ с), інформативним параметром є часовий зсув, а точність вимірювань визначається кореляційною обробкою імпульсів наносекундної тривалості, що підвищує складність апаратури та її вартість;

- модуляція джерела випромінювання на частотах 100 МГц – 10 ГГц, інформативним параметром є зсув фаз на частотах модуляції. Модуляційний метод є більш простим та надійним у порівнянні з розрізненням за часом. Однак просторова розділова здатність на основі цього методу досягає 1 мм, що недостатньо для дослідження форми та розмірів частинок ПВС.

При вимірювальному контролі ПВС може вимірюватись одне значення вимірюваної величини (наприклад, екстинкція), одновимірний масив (спектральний коефіцієнт дифузного відбиття або індикатриса розсіювання), двовимірний масив (зображення з CCD-камери, дифракційна картина, поляризаційне зображення) та багатовимірний масив (серія поляриметричних зображень матриці Мюллера, спектрополяриметричні зображення для різних довжин хвиль та кутів повороту поляризатора, тривимірне голографічне зображення тощо).

Згідно з умовами проведення експерименту він може бути проведений *in vivo* (з лат. безпосередньо на живому об'єкті, неінвазивно), *in vitro* (з лат. у пробірці, в штучних умовах) та *in situ* (з лат. на місці).

1.3 Аналіз структурних схем засобів контролю концентрацій частинок ПВС

Проаналізуємо схемні рішення засобів контролю параметрів ПВС згідно з найбільш перспективним експериментальним оптичним методам за літературними даними та результатами патентного пошуку. Отримати найбільше інформації про властивості завислих частинок ПВС, на основі яких оцінюється їх стан, можливо, використовуючи поляризаційні методи.

Оптична схема лазерного поляризаційного нефелометра наведена на рис. 1.5 [46]. Засіб містить фіксовані поляризатор P і аналізатор A та дві фазові пластинки F та F' , розміщені до і після досліджуваного об'єкта. Для визначення всіх 16 елементів матриці розсіювання необхідно провести вимірювання інтенсивності світла на виході системи при різних кутових положеннях фазових пластинок. У якості джерела світла використано He-Ne лазер 1 типа ЛГН-207А ($\lambda = 632,8$ нм). На плечах гоніометра ГС-5 замість коліматора і зорової трубки змонтовані оптичні кутомірні головки з точністю візуального відліку кутів обертання $1'$, за якими можна контролювати кути обертання поляризатора 2, аналізатора 3 і компенсаторів 4 та 5. Обертання кутомірних головок здійснюється за допомогою крокових двигунів 11 та 12 відповідно. Керуючі імпульси подаються на крокові двигуни через підсилювачі 14 та 15 за допомогою пристрою узгодження 10 за командою з мікроЕОМ 6. Обертання аналізатора з дискретністю $4'$ здійснюється кроковим двигуном 13 та підсилювачем 16 за командою з мікроЕОМ. У якості фотоприймача 7 використано фотоелектронний помножувач ФЭУ-79, що працює у режимі підрахунку фотонів з використанням порогового пристрою 8 та частотомера 9.

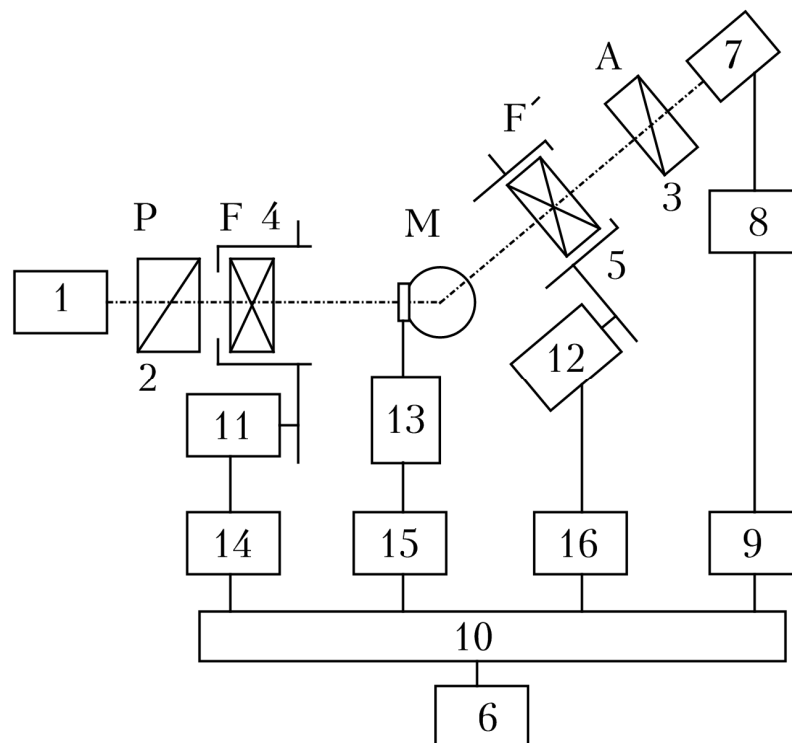


Рисунок 1.5 – Структура лазерного поляризаційного нефелометра

ЛІТЕРАТУРА

1. Луців Н. Елементи методології вимірювання гідробіологічних характеристик водних екосистем / Н. Луців, В. Юзевич // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2009. – № 70. – С. 86–90.
2. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / [В. Д. Романенко, В. М. Жукинський, О. П. Оксіюк та ін.]. – К. : СИМВОЛ–Т, 1998. – 28 с.
3. Методика встановлення і використання екологічних нормативів якості поверхневих вод суші та естуаріїв України / [В. Д. Романенко, В. М. Жукинський, О. П. Оксіюк та ін.]. – К. : ВІПОЛ, 2001. – 47 с.
4. Міхалева М. Проблеми нормування якості водних середовищ, стічних вод, апаратне і метрологічне забезпечення системи гідромоніторингу / М. Міхалева, П. Столярчук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 68. – С. 199–203.
5. Балтиев Ю. С. Методические указания по интегральной оценке качества окружающей среды (экологическая разведка местности) / Ю. С. Балтиев, Г. П. Усов. – М. : Военное издательство, 2005. – 119 с.
6. Зорі А. А. Методи, засоби, системи вимірювання і контролю параметрів водних середовищ / А. А. Зорі, В. Д. Коренєв, М. Г. Хламов. – Донецьк : РВА ДонДТУ, 2000. – 368 с.
7. Руоппа М. Биологические методы исследования водоемов в Финляндии / М. Руоппа, П. Хейнонен. – Helsinki : SUOMEN YMPARISTOKESKUS, 2006. – 112 с.
8. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / [О. М. Арсан, О. А. Давидов, Т. М. Дьяченко та ін.] ; під ред. В. Д. Романенка. – НАН України. Ін-т гідробіології. – К. : Логос, 2006. – 408 с.
9. Яцик А. В. Водогосподарська екологія: у 4-х т., 7 кн. / А. В. Яцик. Т. 3, кн. 5. – К. : Генеза, 2004. – 494 с.
10. Wright J. F. RIVPACS – a technique for evaluating the biological quality of rivers in the UK / J. F. Wright, M. T. Furse, P. D. Armitage // European Water Pollution Control. – 1993. – Vol. 3 (4). – P. 212–227.
11. Семенченко В. П. Принципы и системы биоиндикации текущих вод / В. П. Семенченко. – Минск : Орех, 2004. – 125 с.
12. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах.

Фитопланктон и его продукция / под ред. Г. Г. Винберга. – Л. : ГосНИОРХ, 1984. – 31с.

13. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. III. Методы биологического анализа вод. Прил. 2. Атлас сапробных организмов. – М. : Секретариат СЭВ, 1997. – 227 с.

14. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 196 с.

15. Вода питьевая. Методы анализа. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 282 с.

16. Методические указания. Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем: РД 52.24.633-2002. – [Введ. 2002-04-24]. – М. : Росгидромет, 2002. – 37 с.

17. Рекомендации. Методы токсикологической оценки загрязнения пресноводных экосистем: РД 52.24.566-94. – [Введ. 1994-07-21]. – М. : Росгидромет, 1994. – 28 с.

18. Єдине міжвідомче керівництво по організації та здійсненню державного моніторингу вод. Видання офіційне // Міністерство екології та природних ресурсів України. Нормативний документ. – К. : 2001. – 54 с.

19. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков: ГОСТ 17.1.3.07-82. – [Введ. 1982-03-19]. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 14 с.

20. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества морских вод: ГОСТ 17.1.3.08-82. – [Введ. 1982-03-19]. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 8 с.

21. Сигналізатори токсичності природних та стічних вод біологічні. Загальні технічні вимоги та методи випробування: ДСТУ 4004–2000. – [Чинний від 2000-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 16 с. – (Національний стандарт України).

22. Охорона природи. Гідросфера. Токсикологія води. Терміни та визначення: ДСТУ 3928–1999. – [Чинний від 2000-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. – 20 с. – (Національний стандарт України).

23. Охрана природы. Гидросфера : сб. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 100 с.

24. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В.А. Абакумова. – Л. : Гидрометеоиздат, 1983. – 196 с.
25. Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов. – М. : НИА-Природа, 2002. – 117 с.
26. Вода питна, гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання: ДСанПіН № 383. – [Чинні від 1996-12-23]. – К. : Держспоживстандарт України, 1996. – 24 с. – (Державні санітарні правила і норми, гігієнічні нормативи).
27. Goodnight C.J. Oligochaetes as indicators of pollution / C. J. Goodnight, L. S. Whitley // Proceedings of the 15th Industrial Waste Conference Eng. Purdue Univ. Ext. Ser., 1961. – P. 106–139.
28. Pantle R. Die biologische uberwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse / R. Pantle, H. Buck // Gasund Wasserforsch. – 1955. – № 96(18). – P. 604.
29. Sladeczek V. System of water quality from biological point of view / V. Sladeczek // Ergebnisse der Limnol. – 1973. – V. 7. – P. 1-218.
30. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / под ред. Л. К. Исаева. – СПб. : Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998. – 896 с.
31. Гідроекологічна токсикометрія та біоіндикація : теорія, методи, практика використання / [І. Т. Олексів, Н. С. Ялинська, Л. П. Брагінський та ін.]. – Львів : Світ, 1995. – 440 с.
32. Биоиндикация: теория, методы, приложения / под ред. Г.С. Розенберга. – Тольятти : Изд-во Интер-Волга, 1994. – 266 с.
33. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal of the European Communities. – L 327, 22.12.2000. – 72 p.
34. Зилов Е. А. Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем). / Е. А. Зилов. – Иркутск : Иркут. ун-т, 2008. – 138 с.
35. Царенко П. М. Кадастр водоростей водойм міста Вінниці / [П. М. Царенко, П. Д. Клоченко, О. П. Царенко та ін.]. – Вінниця : О. Власюк, 2006. – 81 с.

36. Масюк Н. П. Водорості в системі органічного світу. / Н. П. Масюк, І. Ю. Костіков. – К. : Академперіодика, 2002. – 178 с.
37. Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов / под ред. Г. И. Глазья. – Новосибирск : Наука, 1979. – 358 с.
38. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ: теорія і практика оптичного вимірювального контролю / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.
39. Электроаналитические методы в контроле окружающей среды / [Кальвода Р., Зыка Я., Штулик К. и др.] ; пер. с англ. под ред. Е. Я. Неймана. – М. : Химия, 1990. – 240 с.
40. Погребенник В. Інформаційно-вимірювальна система для оперативного екологічного моніторингу водного середовища / В. Погребенник, А. Романюк // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2009. – № 70. – С. 50–54.
41. Антоненков Д. А. Особенности применения различных методов исследования размерного состава и концентрации взвешенного в воде вещества / Д. А. Антоненков // Вісник Севастопольського державного технічного університету. – 2009. – №. 97. – С. 181–187.
42. Дыкман В. З. Измерение объемной концентрации взвесей по пульсациям электропроводности морской воды / В. З. Дыкман, О. И. Ефремов // Системы контроля окружающей среды. Методические, технические и программные средства : сб. науч. тр. – Севастополь : МГИ НАНУ, 2003. – С. 48–54.
43. Barbini R. Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica / [R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni et. al.] // International Journal of Remote Sensing. – 2001. – Vol. 22. – P. 369–384.
44. Аксенов Е. Т. Модифицированный лазерный дифрактометр для исследования биологических микрообъектов / Е. Т. Аксенов, Д. В. Мокрова // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 20. – С. 38–43.
45. Васильківський І. В. Автоматизований контроль оптичних параметрів водно-дисперсних середовищ : монографія / І. В. Васильківський, В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 171 с.
46. Приезжев А. В. Лазерная диагностика в биологии и медицине / А. В. Приезжев, В. В. Тучин, Л. П. Шубочкин. – М. : Наука, 1989. – 240 с.

47. Длугунович В. А. Лазерный гониофотометрический Стоксполяриметр / В. А. Длугунович, В. Н. Снопко, О. В. Царюк // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – № 6. – С. 869–874.
48. Мальцев В. П. Сканирующая проточная цитометрия : автореф. дис. на соискание учен. степ. д-ра физ.-мат. наук : спец. 01.04.05 «Оптика» / Валерий Павлович Мальцев ; Институт химической кинетики и горения СО РАН. – Новосибирск, 2000. – 30 с.
49. Scanning flow cytometer modified to distinguish phytoplankton cells from their effective size, effective refractive index, depolarization, and fluorescence / [L. Fiorani, V. P. Maltsev, V. M. Nekrasov et. al.] // Applied optics. – 2008. – Vol. 47. – No. 24. – P. 4405–4412.
50. Dubelaar G. B. Flow cytometry as a tool for the study of phytoplankton / G. B. Dubelaar, R. R. Jonker // Sci. Mar. – 2000. – Vol. 64. – P. 135–156.
51. Ataxonimic assessment of phytoplankton integrity by means of flow cytometry / [C. Steinberg, H. Schafer, M. Siedler et. al.] // Toxicology Letters. – 1995. – No. 78. – P. 10.
52. Savenko Y. V. Monitoring of River Environment Pollution / Y. V. Savenko, S. V. Kopilov, U. F. Zinkovsky // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Sidney, – 2001. – P. 285.
53. Kopilov S. V. Remote Sensing Monitoring of the Mountain Rivers and Underground Waters / S. V. Kopilov, Y. V. Savenko, Y. F. Zinkovsky // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Toronto, – 2002. – P. 132.
54. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №1. – С. 128–131.
55. Giakos G.C. Multifusion Multispectral Lightwave Polarimetric Detection Principles and Systems / George C. Giakos // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 2006. – V. 55, No. 6. – P. 1904–1912.
56. Malkiel E. Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography / E. Malkiel, O. Alquaddoomi, J. Katz // Measurement Science and Technology. – 1999. – Vol. 10, No. 12. – P. 1142–1152.
57. Єльнікова Т. О. Автоматизована система для вимірювань геометричних характеристик фітопланктону у водоймах : автореф.

- дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин» / Єльнікова Тетяна Олександрівна ; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – К. : 2008. – 23 с.
58. Єльнікова Т. О. Автоматизована система для вимірювання геометричних параметрів фітопланктону / Т. О. Єльнікова // Вісник ЖДТУ. – 2009. – №1. – С. 160–164.
59. Муравський Л.І. Використання методу просторово-часової спекл-кореляції для дослідження стану біологічних об'єктів / Л. І. Муравський, Т. І. Половинко, Л. Ф. Франкевич // Міжнародна конференція Фізичні методи в екології, біології та медицині : 3–7 вересня 2008 р. : зб. пр. – Львів-Ворохта, 2008. – С. 30–31.
60. Tuchin V. V. Coherent optical techniques for the analysis of tissue structure and dynamics / V. V. Tuchin // Journal of Biomedical Optics. – 1999. – № 4. – P. 106–124.
61. Introduction to light scattering by biological objects / [N. G. Khlebtsov, I. L. Maksimova, V. V. Tuchin et. al.] // Handbook of optical biomedical diagnostics / [ed.: V.V. Tuchin]. – Bellingham, WA: SPIE Press, 2002. – P. 31–167.
62. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях / В. В. Тучин. – Саратов : СГУ, 1998. – 354 с.
63. Mishchenko M. I. Scattering, absorption, and emission of light by small particles / M. I. Mishchenko, L. D. Travis, A. A. Lacis. – Cambridge : Cambridge University Press, 2002. – 445 p.
64. Fiorani L. Local and remote laser sensing of bio-optical parameters in natural waters / L. Fiorani, A. Palucci // J. Comput. Technol. – 2006. – No. 11. – P. 39–45.
65. Determination of complex refractive index of polystyrene microspheres from 370 to 1610 nm / [X. Y. Ma, J. Q. Lu, R. S. Brock et. al.] // Phys. Med. Biol. – 2003. – Vol. 48. – P. 4165–4172.
66. Analysette-22 NanoTec. Fritsch GmbH Manufacturers of Laboratory Instruments. Table of the technical specifications. – 24 p.
67. Аристов А. А. Биотехническая система экспресс-оценки процесса оседания эритроцитов в микрообъемах : автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук : спец. 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения» / Аристов Александр Александрович ; Томский политехнический университет. – Томск, 2006. – 19 с.

68. Пат. №58696 Україна, МПК (2006) G01N 21/21 Поляриметр зображення / Крупич О. М., Бережний І. В., Влох О. Г., Влох Р. О. ; заявник та патентовласник Інститут фізичної оптики Міністерства освіти і науки України. – №u2002075690 ; заявл. 10.07.02 ; опубл. 15.08.03, Бюл. № 5.
69. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред / [В. Н. Лопатин, А. В. Приезжев, А. Д. Апонасенко и др.]. – М. : Физматлит, 2004. – 384 с.
70. Лопатин В. Н. Введение в оптику взвесей клеток / В. Н. Лопатин, Ф. Я. Сидько. – Новосибирск : Наука, 1988. – 240 с.
71. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами // К.Борен, Д. Хафмен. – М. : Мир, 1986. – 664 с.
72. Венгер Є. Ф. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ / Є. Ф. Венгер, А. В. Гончаренко, М. Л. Дмитрук. – К. : Наукова думка, 1995. – 346 с.
73. Исимару А. Распространение света в случайно-неоднородных средах / А. Исимару. – М. : Мир, 1981. – 280 с.
74. Аззам Р. Эллипсометрия и поляризованный свет // Р. Аззам, Н. Башара. – М. : Мир, 1981. – 583 с.
75. RC-2100. Electronic particle counter (Coulter). Systems Manual. – Shenyang : OMEC, 2009. – 122 p.
76. Getting Started Cytometer For EPICS ALTRATM and ALTRA HyperSort. Systems Manual. Beckman Coulter, Inc. – 2009. – 48 p.
77. Комплекс автоматизированной микроскопии с функцией телемедицины для гематологических, цитологических, гистологических исследований МЕКОС-Ц2 ТУ 9443-002-27543786-2006. Техническое описание. – М. : Медицинские компьютерные системы, 2009. – 14 с.
78. Кватернюк С. М. Автоматизований контроль домішок у водно-дисперсних середовищах / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 2. – С. 164–172.
79. Кватернюк С. М. Оптична контрольно-вимірвальна система для екологічного моніторингу водних об'єктів / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – С. 204–208.
80. Кватернюк С. М. Дослідження оптичних характеристик водно-дисперсних систем / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Ква-

тернюк та ін.] // Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка-ОДС 2005»: III міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2005 р. : тези допов. – Вінниця, 2005. – С. 216–217.

81. Кватернюк С. М. Розробка системи контролю світлорозсіювальних характеристик водних середовищ / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 22–29.

82. Кватернюк С. М. Автоматизована система контролю світлорозсіювальних характеристик водних середовищ / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк та ін.] // I-й Всеукраїнський з'їзд екологів : міжнар. наук.-техн. конф., 4–7 жовтня 2006 р. : тези допов. – Вінниця, 2006. – С. 180.

83. Кватернюк С. М. Дослідження інтерактивного поляризаційного спектроекстинкциметра / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, В. І. Солоненко та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии : XXII міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 жовтня 2007 р. : тези допов. – Ялта, 2007. – С. 134–135.

84. Кватернюк С. М. Неінвазійний спектрополяриметр зображень для дослідження біотканин та гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 5. – С. 15–19.

85. Кватернюк С. М. Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями / [В. В. Барун, С. М. Кватернюк, А. П. Иванов и др.] // Проблемы оптической физики и биофотоники : 12-я Международная молодежная научная школа по оптике, лазерной физике и биофотонике., 23–26 сентября 2008 г. : материалы конф. – Саратов, 2009. – С. 78–85.

86. Кватернюк С. М. Контроль стану водних об'єктів як полідисперсних середовищ на основі методу спектрополяриметричних зображень / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк та ін.] // Екологія та промисловість. – 2010. – № 2. – С. 77–81.

87. Кватернюк С. М. Метод та прилад контролю стану полідисперсних водних середовищ за спектрополяриметричними зображеннями частинок / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк та ін.] // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Серія : Технічні науки. – 2010. – № 1. – С. 119–124.

88. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде / К. С. Шифрин. – М. : ГИТТЛ, 1951. – 288 с.
89. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами : пер. с англ. / Г. Ван де Хюлст. – М. : Из-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
90. Optics of Biological Particles Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Fluorescence and other Optical Properties of Biological Particles for Biological Warfare Agent Sensors, 3-6 October 2005. Series: NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 238. [ed.: A. Hoekstra; V. Maltsev; G. Videen]. – Novosibirsk, 2007. – 284 p.
91. In vivo absorption properties of algal pigments / [R. R. Bidigare, M. E. Ondrusek, J. H. Morrow et. al.] // Ocean Optics. – 1990. – Vol. 1302. – P. 290–302.
92. Кутателадзе С. С. Основы функционального анализа / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : Изд-во Ин-та Математики СО РАН, 2001. – 336 с.
93. Пришивалко А. П. Оптические и тепловые поля внутри светорассеивающих частиц / А. П. Пришивалко. – Минск : Навука и тэхніка, 1983. – 190 с.
94. Кватернюк С. М. Моделювання методом Монте-Карло спектрополяризаційних зображень оптично м'яких частинок полідисперсних біологічних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Іванов та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2. – С. 79–86.
95. Москалев В. А. Теоретические основы оптико-физических исследований / В. А. Москалев. – Л. : Машиностроение, 1987. – 318 с.
96. Ванюрихин А. И. Оптико-электронные поляризационные устройства / А. И. Ванюрихин, В. П. Герчановская. – К. : Техніка, 1984. – 160 с.
97. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 856 с.
98. Кватернюк С. М. Спектрофотометричний контроль дисперсності домішок у неоднорідних водних середовищах / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005) : VIII міжнар. наук.-техн. конф., 24–28 жовтня 2005 р. : тези допов. – Вінниця, 2005. – С. 55.

99. Кватернюк С. М. Математичне моделювання поляризації випромінювання у світлорозсіювальних середовищах / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк та ін.] // XIII міжнародна конференція з автоматичного управління, 25–28 вересня 2006 р. : матеріали конф. – Вінниця, 2006. – С. 152–157.
100. Кватернюк С. М. Інтелектуалізована комп'ютерна система автоматизованого контролю оптичних параметрів водно-дисперсних середовищ / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк та ін.] // ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2006 : V міжнар. конф., 10–14 жовтня 2006 р. : матеріали конф. – Том 2. – Вінниця, 2006. – С. 628–630.
101. Кватернюк С. М. Математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок полідисперсних водних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 9–13.
102. Мокін В. Б. Математичні моделі і програми для оцінювання якості річкових вод : монографія / В. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 152 с.
103. Мокін В. Б. Математичні моделі для контролю та управління якістю річкових вод : монографія / В. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 172 с.
104. Якість води. Відбирання проб. Частина 3. Настанови щодо зберігання та поводження з пробами: ДСТУ ISO 5667–3. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2002. – 34 с. – (Національний стандарт України).
105. Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб води з річок та інших водотоків: ДСТУ ISO 5667–6–2001. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2002. – 10 с. – (Національний стандарт України).
106. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков: ГОСТ 17.1.5.05-85. – [Введ. 1986-07-01]. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 30 с.
107. Пробовідбірники автоматичні природних та стічних вод. Загальні технічні вимоги та методи випробування: ДСТУ 3920–1999. – [Чинний від 2000-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. – 20 с. – (Національний стандарт України).

108. Охорона навколишнього природного середовища. Автоматизовані системи контролю якості природних вод: Типи та основні вимоги: ДСТУ 3831-98. – [Чинний від 2000-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. – 23 с. – (Національний стандарт України).
109. Аналітичні екологічні прилади та системи: монографія / В. А. Порєв, О. А. Дашковський, Я. Л. Миндюк, В. П. Приміський ; під заг. ред. В. А. Порєва. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 336 с.
110. Монохроматоры МДР-204, МДР-206. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – СПб. : ЛОМО, 2009. – 48 с.
111. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия: ГОСТ 15130–86. – [Введ. 1988-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 30 с.
112. Детали оптические. Классы чистоты поверхности. Методы контроля: ГОСТ 11141–84. – [Введ. 1985-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 23 с.
113. Кюветы прямоугольные кварцевые для спектрофотометров. Основные размеры. Технические требования: ГОСТ 20903–75. – [Введ. 1976-07-01]. – М. : Издательство стандартов, 1975. – 5 с.
114. Материалы оптические. Параметры: ГОСТ 23136–93. – [Введ. 1995-07-31]. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 25 с.
115. Микроскопы биологические «БИОЛАМ 70». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Л. : ЛОМО, 1972. – 32 с.
116. Device performance specification: KAF 1401E 1320(H) x 1035(V) Enhanced Response Full-Frame CCD. Kodak Corporation, 2002. – 18 p.
117. ATmega16, ATmega16L. DataSheet. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash. Atmel Corporation. – 2009. – 357 p.
118. DS18B20. DataSheet. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Maxim Integrated Products, Inc. – 2009. – 22 p.
119. Миранович В. Мощные светодиоды: особенности применения, проблемы и методы решения на примере светодиодов компании Prolight Opto Technology. / В. Миранович, И. Филоненко // Электронные компоненты. – 2007. – № 6. – С. 45–49.
120. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник: в 8-ми т. / [под ред. В. В. Клюева]. – Т. 1 ; в 2-х кн. – Кн. 1. Ф. Р. Соснин. Визу-

- альный и измерительный контроль. Кн. 2. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2008. – 560 с.
121. Булатов В. Н. Элементы и узлы информационных и управляющих систем (основы теории и синтеза) : учебное пособие / В. Н. Булатов. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 200 с.
122. Патент №35499 Україна, МПК (2006) G01N 21/21 Спектрополяриметр зображення для діагностики матеріалів біомедичного походження / Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Іванов А.П., Барун В. В.; власник Вінницький національний технічний університет. – №u200804100 ; заявка 1.04.08 ; опубл. 25.09.08, Бюл. №18.
123. Патент №5299 Республика Беларусь, МПК (2006) G01N 21/21 Спектральный поляриметр изображения для диагностики сред биомедицинского происхождения / Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Иванов А. П., Барун В. В. ; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Институт физики им. Степанова НАН Беларуси. – №u20080575 ; заявл. 17.07.08, опубл. 30.06.09, Бюл. №10.
124. Засоби автоматизованого контролю оптично м'яких частинок гуморальних середовищ на основі методу спектрофотометрії зображень / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // II-ий Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю : міжнар. наук.-техн. конф., 23–26 вересня 2009 р. : матеріали конф. – Вінниця, 2009. – С. 341–344.
125. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
126. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB/ Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
127. Чен К. MATLAB в математических исследованиях : пер. с англ. / К. Чен, П. Джиглинг, А. Ирвинг – М. : Мир, 2001. – 346 с.
128. Определитель пресноводных водорослей СССР [под ред. М. М. Голлербах]. – М. : АН СССР, 1986. – С. 1–14.
129. Баринава С. С. Биоразнообразия водорослей-индикаторов окружающей среды / С. С. Баринава, Л. А. Медведева, О. В. Анисимова. – Тель Авив : PiliesStudio, 2006. – 498 с.
130. Dell'Uomo A. Use of algae for monitoring rivers in Italy: current situation and perspectives. Use of algae for monitoring rivers. / A. Dell'Uomo. – Agence de l'Eau Artos-Picardie, 1997. – P. 17–25.

131. Левич А. П. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга / А. П. Левич, Н. Г. Булгаков, В. Н. Максимов. – М. : НИА-Природа, 2004. – 271 с.
132. Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current / [E. Millan-Nunez, M. E. Sieracki, R. Millan-Nunez et. al.] // *Deep-Sea Research*. – 2004. – Vol. 51. – P. 817–826.
133. Quantitative determination of cyanobacteria in mixed phytoplankton assemblages by an in vivo fluorimetric method / [T. Y. Lee, M. Tsuzuki, T. Takeuchi et. al.] // *Analytica Chimica Acta*. – 1995. – Vol. 302, No. 1. – P. 81–87.
134. Шитиков В. К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко – Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
135. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change / [C. S. Reynolds, A. E. Irish, J. A. Elliott et. al.] // *Ecological Modelling*. – 2001. – Vol. 140, No. 3. – P. 271–291.
136. Maritorena S. Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: characteristics, benefits and issues / S. Maritorena, A. Mangin, D. A. Siegel. // *Remote Sensing of Environment*. – 2010. – No. 114(8). – P. 1791–1804.
137. Sosik H. M. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System / H. M. Sosik, B. G. Mitchell // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 1995. – Vol. 42. – No. 10. – P. 1717–1748.
138. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples / [B. G. Mitchell, M. Kahru, J. Wieland et. al.] // *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensors Validation*. – 2003. – Vol. 4. – P. 39–64.
139. Лях А. М. Обзор методов количественного учета фитопланктона / А. М. Лях, А. М. Суворов, Ю. В. Брянцева // *Системы контроля окружающей среды : сб. науч. тр.* – Севастополь : НАН Украины. МГИ, 2002. – С. 425–430.
140. Coastal water monitoring and remote sensing products validation using ferrybox and above-water radiometric measurements / [S. Kaitala,

- G. Zibordi, F. Mélin et. al.], // EARSel eProceedings. – 2008. – No. 7(1). – P. 75–80.
141. Брагинский Л. П. Пресноводный планктон в токсической среде / Л. П. Брагинский, И. М. Величко, Э. П. Щербань. – К. : Наукова думка, 1987. – 180 с.
142. Шуйский В. Ф. Биоиндикация качества водной среды, состояния пресноводных экосистем и их антропогенных изменений / В. Ф. Шуйский, Т. В. Максимова, Д. С. Петров // VII междунар. конф. Экология и развитие Северо-Запада России, 2–7 августа 2002 г. : сб. научн. докл. –СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2002. – С. 21–40.
143. Time-series analysis of remotely-sensed SeaWiFS chlorophyll in river-influenced coastal regions / [J. G. Acker, E. McMahon, S. Shen et. al.] // EARSel eProceedings. – 2009. – No. 8(2). – P. 114–139.
144. Розробка інтерактивних оптичних засобів для поляризаційної діагностики біотканин та гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии : XXII міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 жовтня 2007 р. : тези допов. – Ялта, 2007. – С. 135–136.
145. Дослідження біотканин на основі спектрополяриметрії / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк І. В. Васильківський та ін.] // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007) : III міжнар. наук.-техн. конф., 31 травня – 2 червня 2007 р. : тези допов. – Вінниця, 2007. – С. 208–209.
146. Кватернюк С. М. Особенности спектрофотометрической диагностики суспензии эритроцитов излучению / [А. П. Иванов, В. В. Барун, С. М. Кватернюк та ін.] // II-ий Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. : зб. наук. статей. – Вінниця, 2009. – С.294–298.
147. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях / И. П. Захаров, В. Д. Кукуш. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
148. Ціделко В. Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання : монографія / В. Д. Ціделко, Н. А. Яремчук. – К. : Видавництво «Політехніка», 2002. – 176 с.
149. Поджаренко В. О. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський, В. Ю. Кухарчук. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 128 с.

150. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества. / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.
151. Загруддинов Г. М. Достоверность автоматизированного контроля / Г. М. Загруддинов. – Казань : Изд-во КГУ, 1980. – 279 с.
152. Вентцель Е. С. Теория вероятности и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высшая школа, 2000. – 480 с.
153. Вода. Норми похибки вимірювань показників складу і властивостей: ДСТУ ГОСТ 27384: 2005. – [Чинний від 2006-04-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2006. – 14 с. – (Національний стандарт України).
154. Контроль стану водних об'єктів методом Зелінки–Марвана з використанням спектрополяриметричних зображень частинок фітопланктону / [О. О. Цвенько, С. М. Кватернюк, Я. В. Мороз та ін.] // Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень : VII міжнар. наук. конф., 11-14 травня 2010 р. : матеріали конф. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 142–143.
155. Кватернюк С. М. Автоматизований контроль екологічного стану водних об'єктів на основі спектрополяриметричних досліджень фітопланктону / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк // Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта–наука–виробництво–2010: XIII міжнар. наук.-практ. конф., 31 березня – 2 квітня 2010 р. : матеріали конф. – Харків, 2010. – С. 15–20.

Наукове видання

**Квaternюк Сергій Михайлович
Петрук Василь Григорович**

**СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ
КОНЦЕНТРАЦІЙ ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНИХ
ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлений С. Квaternюком

Підписано до друку 22.09.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,01
Наклад 100 прим. Зам № 2012-166

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.