

## НОВИЙ МЕТОД ФІТОІНДИКАЦІЇ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

### Володимир Никифоров

доктор біологічних наук, професор кафедри екології та біотехнологій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,  
Кременчук, Україна, 39600, volnyk2015@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8917-2340

### Сергій Дігтяр

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та біотехнологій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,  
Кременчук, Україна, 39600, sergiusvictor@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6872-2865

### Оксана Сакун

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та біотехнологій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,  
Кременчук, Україна, 39600, oksanaansakun@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1573-4333

### Роман Вісич

магістр кафедри екології та біотехнологій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,  
Кременчук, Україна, 39600

### Марія Плахотна

учениця 10-Б класу

Кременчуцький ліцей № 10 «Лінгвіст», вул. Лейтенанта Покладова, 8,  
Кременчук, Україна, 39600

На підставі сформованих критеріїв оцінювання екологічного стану водних об'єктів уперше розроблено й апробовано програмний продукт, що дозволяє розраховувати хімічний склад води різнотипних водойм (вміст 10 поширеніших у воді іонів) та інші параметри (жорсткість, рН, загальну мінералізацію, коефіцієнти трапляння, раритетності та біологічного різноманіття видів). За літературними даними створено базу гідрохімічних і гідроботанічних даних (характеристики типових макрофітів і хімічний склад водних екосистем, у яких вони оселяються). Визначено макрофіти, які є індикаторами окремих показників якості води (підвищення кислотності, вмісту хлоридів, забруднення важкими металами, азотистими сполуками, кальцієм тощо). Виявлені види-індикатори органічного забруднення води розподілено відповідно до системи трофності води. Проведено порівняльний аналіз реальних (визначених хімічними методами) і віртуальних (визначених екологічними методами) даних концентрації провідних іонів у двох локаціях Кам'янського водосховища, результати якого свідчать про достовірність даних, отриманих за допомогою нового методу гідрофітоіндикації на акваторії регіонального ландшафтного парку «Кременчуцькі Плавні». Розроблена комп'ютерна інформаційна система «Моніторинг екологічного стану водних об'єктів» дозволяє прогнозувати стан різноманітних водних екосистем на підставі порівняльного аналізу гідрохімічного режиму тестованих водойм і генерувати екологічний паспорт для них, що важливо для ведення державного кадастру водних ресурсів. Найближчим часом планується розробити мобільний додаток, завдяки якому кожен бажаючий може узнати про якість води в цікавій для нього водоймі.

**Ключові слова:** фітоіндикація, водні екосистеми, макрофіти, програмне забезпечення, якість води, моніторинг.

**Актуальність роботи.** Зростання забруднення водойм стає загрозливим для всієї біосфери. Збільшення антропогенного навантаження зумовлює погіршення як кількісних, так і якісних показни-

ків поверхневих вод. Проблема екологічного стану водних об'єктів є актуальною для всіх водних басейнів України, оскільки вони напряму пов'язані із джерелами водопостачання, зокрема питної води.

Тому в наш час постала актуальна потреба створення нових екологічних технологій оцінювання якості води у природних умовах, що не потребують багато часу, складного обладнання та дорогих реактивів, за допомогою яких можна провести попередню оцінку якості води, визначити заходи, спрямовані на її поліпшення, організувати екологічний моніторинг, спрогнозувати перспективи можливих sukcesій водних екосистем. У зв'язку із цим метою наших досліджень передбачено розроблення нового методу гідрофітоіндикації поверхневих вод.

На підставі розуміння, що кожен вид оселяється в певній екологічній ніші, що по суті є багатофакторною системою чинників, під впливом яких цей вид перебуває, виникла ідея зібрати інформацію про хімічний склад води, у якій зростає обраний макрофіт. Тому ідея нового методу фітоіндикації водних екосистем полягає в тому, що сформована база названих даних дозволить оригінальному програмному продукту розраховувати усереднену концентрацію речовин для конкретної водойми залежно від угруповання макрофітів, що в неї зареєстровані. Також, на наш погляд, достовірність результатів якісного та кількісного гідрохімічного аналізу залежить не лише від видового складу, а і від площі покриття водного дзеркала кожним видом.

Розроблене програмне забезпечення має також генерувати екологічний паспорт водного об'єкта – уніфікований документ, який буде компілювати не тільки вміст у воді найбільш поширених п'яти катіонів і п'яти аніонів, а й інших показників і параметрів, важливих для оцінювання стану водної екосистеми, на кшталт трофності, сапробності, відносної утилізації Нітрогену тощо, а також перевищення водогосподарського ГДК і головне, на наш погляд, – заходи, спрямовані на збалансовану експлуатацію екологічних послуг, охорону та відновлення (якщо потрібно) даного гідрооб'єкта. Планується, що системна паспортизація водойм на визначеній території слугуватиме науковими засадами для кадастру водних ресурсів і моніторингу в регіонах України.

**Аналіз попередніх досліджень.** На першому етапі роботи проведений пошук публікацій у міжнародних науково-метричних базах даних Scopus & WoS, проіндексованих у них у період із 2000 р. На жаль, результати пошуку показали невелику кількість джерел, присвячених тематиці наших досліджень. Серед них найбільшої уваги заслуговують одинадцять статей і розділів монографії [1–11]. Водночас найбільшу кількість

даних про хімічний склад води для оригінального програмного забезпечення знайдено в науковій монографії, підготовленій на основі міжнародної кооперації українських, чеських і словацьких ботаніків, «Макрофіти – індикатори змін природного середовища» [12].

Вагомим науковим підґрунтям для нашого проєкту також послужили монографії «Фітоіндикація екологічних факторів» [13] і «Рослинність і бактеріальне населення Дніпра та його водосховищ» [14], «Національний каталог біотопів України» [15], матеріали Четвертої науково-теоретичної конференції «Класифікація рослинності та біотопів України» [16], а також інші публікації вітчизняних науковців [17; 18]. Сучасні дані про інформаційно-аналітичну діяльність, новітні аспекти створення програмного забезпечення, а також про найкращі засоби та платформи розроблення програмного продукту, які повинен знати розробник, знайдено в інтернеті [19–24].

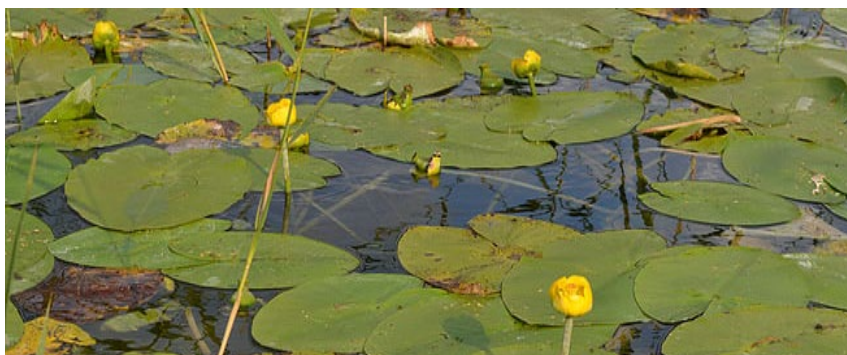
**Предмет, об'єкт і методи досліджень.** У результаті польових і камеральних досліджень, а також за літературними джерелами було зібрано дані індикаційних властивостей для 31 гідрофіта, які є основою для створення графічного зображення гідрохімічного режиму водних екосистем (Кам'янського водосховища) за 12 гідрохімічними показниками (по п'ять провідних за концентрацією катіонів ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) й аніонів ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), загальна мінералізація та рН. Видовий склад макрофітів має закодований вигляд (код складається з перших трьох літер назви роду та видового епітета) для зручності формування бази даних:

*Aldrovanda vesiculosa* L. – Альдрованда пухирчаста – *Aldves*; 2) *Azolla filiculoides* Lamark – Азолла папоротевидна – *Azofil*; 3) *Batrachium aquatile* (L.) Dumort. – Водяний жовтець водний – *Bataqu*; 4) *Batrachium circinatum* (Sibrth.) Spach. – Водяний жовтець закручений – *Batcir*; 5) *Ceratophyllum demersum* L. – Кушир занурений – *Cerdem*; 6) *Ceratophyllum submersum* L. – Кушир напівзанурений – *Cersub*; 7) *Eloдея canadensis* Michx. – Елодея канадська – *Elocan*; 8) *Hydrocharis morsus Ranae* L. – Жабурник звичайний – *Hydmor*; 9) *Lemna gibba* L. – Ряска горбата – *Lemgib*; 10) *Lemna minor* L. – Ряска мала – *Lemmin*; 11) *Lemna trisulca* L. – Ряска триборозенчаста – *Lemtri*; 12) *Marsilea quadrifolia* L. – Марсилія чотирилиста – *Marqua*; 13) *Myriophyllum spicatum* L. – Водопериця колосиста – *Myrspi*; 14) *Myriophyllum verticillatum* L. – Водопериця кільчаста – *Myrver*; 15) *Najas marina* L. – Пізуха морська –

*Najmar*; 16) *Nuphar lutea* (L.) Smith. – Глечики жовті – *Nuplut*; 17) *Nymphaea alba* L. – Латаття біле – *Nymalb*; 18) *Nymphaea candida* J. et C. Presl – Латаття сніжно-біле – *Nymcan*; 19) *Nymphoides peltata* (S.G. Gmel.) O. Kuntze – Плавун щитолістий – *Nympel*; 20) *Potamogeton crispus* L. – Рдесник кучерявий – *Potcri*; 21) *Potamogeton gramineus* L. – Рдест колосовидний – *Potgra*; 22) *Potamogeton lucens* L. – Рдесник блискучий – *Potluc*; 23) *Potamogeton natans* L. – Рдесник плаваючий – *Potnat*; 24) *Potamogeton perfoliatus* L. – Рдесник пронизанолистий – *Potper*; 25) *Potamogeton trichoides* Cham. et Schlecht. – Рдесник нитчас-

тий – *Pottric*; 26) *Salvinia natans* (L.) All. – Сальвінія плаваюча – *Salnat*; 27) *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schiedl. – Спіродела багатокоренева – *Sipol*; 28) *Stratiotes aloides* L. – Водяник різак алоевидний – *Stralo*; 29) *Trapa natans* L. – Водяний горіх плаваючий – *Tranat*; 30) *Utricularia vulgaris* L. – Пухирник звичайний – *Utrvul*; 31) *Vallisneria spiralis* L. – Валіснерія спіральна – *Valspi*.

Нижче наведено приклад уніфікованої інформації, зібраної для кожного індикаторного виду макрофітів для формування бази гідрохімічних і гідроботанічних даних (характеристики типо-



***Nuphar lutea* (L.) Smith. – Глечики жовті – *Nuplut***

**Географія:** Західна і Східна Європа, Середня та Мала Азія, Північна Америка, Середземномор'я, Кавказ.

**Біологія:** багаторічник, водний геофіт, аерогілатофіт, німфеїд, ентомофіл, гідрохор, зоохор, К-S-стратег.

**Екологія:** геліофіт, слабкий ацидофіл, термофіл, мезоевтроф.

**Хімія:** рН – 5,8–7,6, Ca<sup>2+</sup> – 38,9, Mg<sup>2+</sup> – 17,6, Na<sup>+</sup> – 25,0, K<sup>+</sup> – 4,2, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – 0,2, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 10,6, Cl<sup>-</sup> – 15,0, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> – 0,3, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 2,2, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – 0,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Рис. 1. Уніфікована інформація про індикаторний макрофіт для бази даних

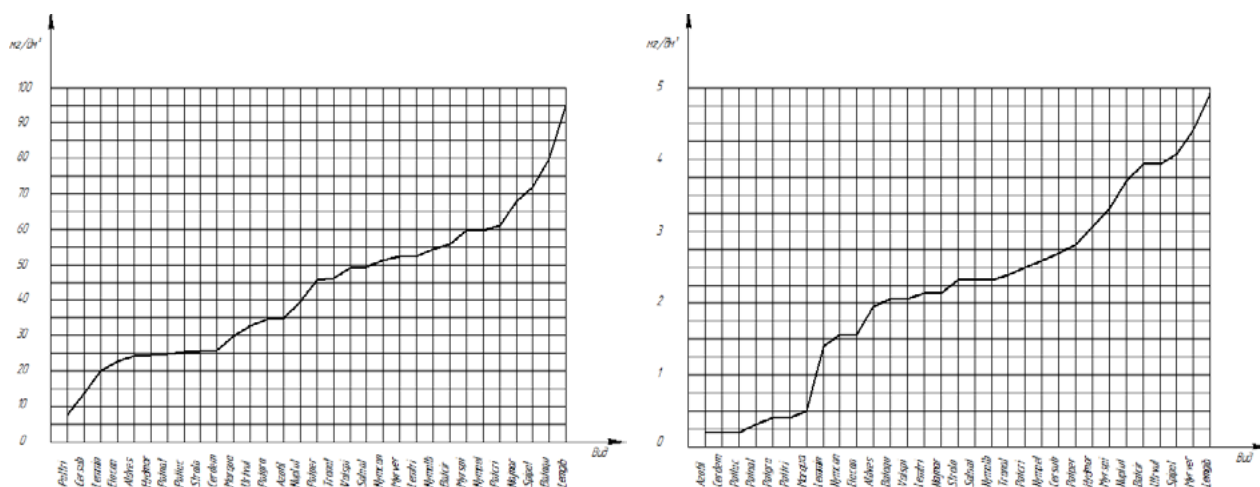


Рис. 2. Графіки індикаційних властивостей досліджуваних макрофітів щодо концентрації Ca<sup>2+</sup> (ліворуч) і NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (праворуч), мг/дм<sup>3</sup>

вих макрофітів і хімічний склад водних екосистем, у яких вони оселяються) (рис. 1). Наступним кроком роботи було проведено ранжування й апроксимацію середньозваженої концентрації для кожного з 10 іонів (мг/дм<sup>3</sup>), що підлягають аналізу, від індикаторного виду з мінімальним до виду з максимальним її значенням (рис. 2), а також щодо кислотності води (рН).

Предметом діджиталізації оригінальної бази даних є оцінювання екологічного стану водних об'єктів відповідно до алгоритму системи моніторингу за допомогою комп'ютерної інформаційної системи (далі – КІС) «Моніторинг хімічного стану водних об'єктів». Створене нами програмне забезпечення для даної інформаційної системи забезпечує виконання таких функцій, як: редагування вхідної інформації; представлення даних, що містяться в базі, у зручному для користувача вигляді; автоматичний розрахунок концентрації іонів, рН, загальної мінералізації, коефіцієнта відносної утилізації Нітрогену, коефіцієнта траплення, коефіцієнта Шеннона тощо на основі введеної інформації. вивід на екран результатів; формування звітів щодо даного водного об'єкта та їх збереження у файлі; побудова графіків змін хімічного режиму водних об'єктів тощо.

Об'єктом діджиталізації результатів наших досліджень є процес визначення концентрації іонів у воді, розрахунок усіх математичних складників і створення графіків зміни вмісту іонів у водному об'єкті за визначений період часу. Визначені вимоги щодо реалізації комплексу завдань розроблюваного програмного забезпечення передбачають можливість його майбутньої модернізації в разі розширення функціональних можливостей.

Вихідною інформацією завдання є хімічний режим води, який складається із вхідних даних.

Концентрація хімічних сполук у водному об'єкті (C) розраховується за формулою 1:

$$C = P \cdot E / 100, \quad (1)$$

де P – відсоток рослини у водному об'єкті; E – хімічний елемент, постійна величина.

Загальна мінералізація (M) розраховується за формулою 2:

$$M = 1,2 \cdot K. \quad (2)$$

Коефіцієнт утилізації Нітрогену (U) розраховується за формулою 3:

$$U = 0,78 \cdot C(NH_4^+) / (0,30 \cdot C(NO_2^-) + 0,23 \cdot C(NO_3^-)). \quad (3)$$

Коефіцієнт траплення (M) – це коефіцієнт, який показує частотність даного виду у водних об'єктах, він розраховується за формулою 4:

$$M = a \cdot 100\% / b, \quad (4)$$

де a – кількість водойм, у яких знайдений вид; b – кількість усіх досліджених водойм.

Коефіцієнт Шеннона (H – індекс біорозмаїття) – безрозмірний показник, який застосовується в екології для визначення ступеня рівномірності розподілу ознак об'єктів вибірки. Подвійним поняттям для різноманітності є поняття однорідності, або концентрації. Коефіцієнт Шеннона розраховується за формулою 5:

$$H = - \sum p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (5)$$

де  $p_i = x_i / \sum x_i$  відповідають числу ознак (наприклад особин) обраного об'єкта (як-от вид) у вибірці (наприклад в угрупованні). Теоретично H – це функція, яка приймає максимальне значення тоді, коли має місце повна вирівняність розподілу  $\log_2 N$ , що відповідає найбільшому розмаїттю системи (N – загальне число об'єктів, наприклад видів в угрупованні, а мінімальне дорівнює 0).

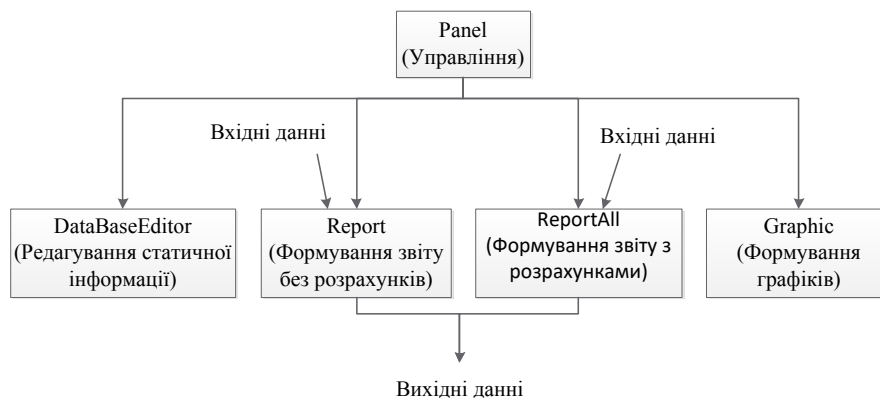


Рис. 3. Функціональна структура програми

Згідно із вхідними та вихідними даними, а також поставленим завданням, програму було поділено на чотири основні модулі, описані нижче. Загальна функціональна структура програми показана на рисунку 3.

Для створення програми було зроблено огляд і вибір мови програмування. С++ – мова програмування високого рівня з підтримкою декількох парадигм програмування: об'єктно-орієнтованої, узагальненої та процедурної. Її визначено стандартом ISO/IEC 14882:2003. Під час створення С++ прагнули зберегти сумісність із мовою С. Більшість програм на С справно працюватимуть і з компілятором С++, яка має синтаксис, заснований на синтаксисі С. Нововведеннями С++ порівняно із С є: підтримка об'єктно-орієнтованого програмування через класи; підтримка узагальненого програмування через шаблони; доповнення до стандартної бібліотеки; додаткові типи даних; простори імен; вбудовані функції; перевантаження операторів; перевантаження імен функцій; посилання й оператори управління вільно розподіленою пам'яттю [19; 20].

Сі++ додає до Сі об'єктно-орієнтовані можливості. Вона вводить класи, які забезпечують три найважливіші властивості ООП: інкапсуляцію, успадкування та поліморфізм. Основним способом організації інформації в Сі++ є класи. На відміну від типу структури мови Сі, що складається тільки з полів, клас Сі++ складається з полів і функцій-членів або методів. Поля бувають публічними (public), захищеними (protected) і приватними (private). У Сі++ тип «структура» є аналогічним типу «клас». Різниця полягає в тому, що за усталеним налаштуванням поля та функції-члени у структури публічні, а у класу – приватні [21–23].

Розроблене програмне забезпечення КІС «Моніторинг хімічного стану водних об'єктів» складається із 4-х модулів: 1) Database Editor – забезпечує взаємодію з базою даних та являє собою графічну панель; 2) Report – даний модуль являє собою графічну панель, яка відповідає за створення звітів з моніторингу водного об'єкта; 3) AllReport – даний модуль являє собою графічну панель, яка відповідає за створення звітів із математичними розрахунками; 4) Graphic – даний модуль являє собою графічну панель, яка на основі вхідних

Таблиця 1

**Гідрохімічний склад Кам'янського водосховища (гирло р. Псел)**

Назва параметра		Значення	
Сума концентрацій 10 іонів		238,63/244,66	
Загальна мінералізація		286,40/293,59	
Кислотність		8,07/7,39	
Коефіцієнт відносної утилізації Нітрогену		2,69	
Коефіцієнт Шеннона		1,72	
<b>Концентрація (мг/дм<sup>3</sup>)</b>			
Ca <sup>2+</sup>	38,05/45,32	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,71/2,05
Mg <sup>2+</sup>	18,22/15,25	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,29/–
Na <sup>+</sup>	9,69/10,07	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,28/1,35
K <sup>+</sup>	13,50/9,87	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	108,67/117,48
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,78/–	Cl <sup>-</sup>	38,36/43,27

Таблиця 2

**Гідрохімічний склад Кам'янського водосховища (о. Стрілецький-4)**

Назва параметра		Значення	
Сума концентрацій 10 іонів		160,43/157,44	
Загальна мінералізація		192,50/188,93	
Кислотність		7,73/	
Коефіцієнт відносної утилізації Нітрогену		2,19	
Коефіцієнт Шеннона		1,52	
<b>Концентрація (мг/дм<sup>3</sup>)</b>			
Ca <sup>2+</sup>	50,66/42,93	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,47/3,05
Mg <sup>2+</sup>	17,29/21,45	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,26/–
Na <sup>+</sup>	13,74/10,87	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,77/1,05
K <sup>+</sup>	11,85/8,95	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	33,63/42,00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,56/–	Cl <sup>-</sup>	21,45/27,14

даних буде графік зміни хімічного складу водного об'єкта за визначений проміжок часу.

**Матеріал і результати досліджень.** Протягом літа 2022 р. у двох локаціях акваторії Кам'янського водосховища (гирло р. Псел і на о. Стрілецький-4) було зроблено 10 гідроботанічних описів (по п'ять для кожної локації), дані яких (наприклад, опис № 1: *Bataqu-0,1, Cerdem, Elocan-0,25, Hydmor, Lemgib 0,3, Lemtri-0,2, Myrspi-0,05, Nuplut-0,05, Potcri-0,03, Potnat-0,05, Pottric-0,05, Salnat-0,01, Tranat-0,01*) було введено до оригінального програмного продукту, який забезпечує аналітичний супровід нового методу гідрофітоіндикації й отримання відповідних даних (табл. 1 і 2).

Водночас у цих локаціях було відібрано проби води, які проаналізовано традиційними хімічними методами з використанням відповідних приладів і обладнання. У результаті досліджень отримано дані про концентрацію (мг/дм<sup>3</sup>) у воді хімічних інгредієнтів, а саме п'яти катіонів (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) і п'яти аніонів (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), двома способами для порівняння.

Межа похибки під час порівняльного аналізу не перевищує 0,25 у разі розрахунку концентрації за кожним окремим іоном. Але в результаті сумарної 10-ти іонів, зокрема під час визначення загальної мінералізації, межа похибки знижується до 0,02, що, на наш погляд, виправдовує застосування нового коефіцієнта, відносно великих витрат часу, реагентів і обладнання під час використання традиційних методів хімічного аналізу.

Результати порівняння вмісту аналізованих іонів із даними минулих років, наприклад отриманих 20 років тому [25], набувають статусу моніторингових досліджень. На заключному етапі створення спеціального програмного забезпечення нового методу гідрофітоіндикації з використанням інформаційно-аналітичних засобів і технологій [23] розроблено спеціальний інструментарій для автоматизованого формування екологічного паспорта водного об'єкта.

**Висновки та перспективи досліджень.** За літературними даними створено базу гідрохімічних і гідроботанічних даних (характеристики типових макрофітів і хімічний склад водних екосистем, у яких вони оселяються). Визначено макрофіти, які є індикаторами окремих показників якості води (підвищення кислотності, вмісту хлоридів, забруднення важкими металами, азотистими сполуками, кальцієм тощо). Виявлені види-індикатори органічного забруднення води розподілено відповідно до системи трофності води.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє розраховувати середньо зважену концентрацію п'яти катіонів (кальцію, магнію, натрію, калію й амонію) і п'яти аніонів (сульфатів, хлоридів, фосфатів, нітратів і нітритів), які становлять у поверхневих водах понад 80% від загальної мінералізації, та рН. Передбачається, що програма, окрім названих параметрів, буде здатна визначати коефіцієнти Шеннона та відносної утилізації Нітрогену, індекс сапробності, рівень трофності води тощо. Результати порівняльного аналізу реальних (визначених хімічними методами) і віртуальних (визначених екологічними методами) даних концентрації провідних іонів у двох локаціях Кам'янського водосховища свідчать про достовірність даних, отриманих за допомогою нового методу гідрофітоіндикації.

Оригінальна комп'ютерна інформаційна система «Моніторинг екологічного стану водних об'єктів» дозволяє генерувати екологічний паспорт водойм, необхідний для кадастру водних ресурсів, а також для визначення хімічного складу штучних водойм (біологічних ставків, вторинних каналізаційних відстійників, біоплато й інших біоінженерних споруд). Найближчим часом планується розробити мобільний додаток, завдяки якому кожен, хто бажає, може узнати про якість води в цікавій для нього водоймі.

Майбутні дослідження будуть присвячені пошуку та діджиталізації нових критеріїв оцінювання якості стану водних екосистем, наприклад гідрохімічних і гідробіологічних коефіцієнтів відносної утилізації Нітрогену, трапляння, раритетності, різноманітності Шеннона, показників трофності та сапробності води тощо. На віддалену перспективу є розуміння, що на підставі аналізу бази даних заходів, спрямованих на збалансовану експлуатацію водних ресурсів, охорону та відновлення (якщо потрібно) водного об'єкта, передбачених його екологічним паспортом, можна забезпечити ефективний менеджмент екологічних послуг для кожної водойми.

Протягом наступного року передбачається вивчення наявних технологій, методів і засобів процесорної обробки цифрових зображень індикаторних макрофітів, зокрема тих, що перебувають у вільному інтернет-доступі. На підставі отриманих даних, зокрема й аналізу наявних моделей та інструментів для побудови нейронних мереж, призначених для обробки зображень та вирішення завдань класифікації об'єктів, планується розробити оригінальну модель штучної нейромережі для розпізнавання та класифікації

електронних зображень асоціацій макрофітів різних гідроекосистем.

Надалі на основі розробленої таким чином інформаційно-аналітичної нейросистеми буде створено відповідний додаток для Android та/або iOS. Передбачається, що додаток буде мати зручну навігацію, максимально інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, а також продуману технічну складову частину додатка, розташування елементів і їхніх функцій, оскільки після публікації додатка вносити в нього правки буде складніше. Залишені під час реєстрації номер телефону й e-mail користувачів дозволять нам надалі провести комплексний моніторинг екологічного стану водних об'єктів. Програма Previewer для мобільних телефонів дозволить у режимі реального часу спостерігати за тим, як модулі змінюють наш додаток.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Aquatic macrophytes as indicators of water quality in subtropical shallow lakes, Southern Brazil / S.A. Pereira et al. *Acta Limnologica Brasiliensia*. 2012. № 24. P. 52–63.
2. Indicators: Macrophytes. URL: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-macrophytes> (дата звернення: 10.12.2022).
3. Macrophytes as biological indicators of organic pollution in the Lepenci River Basin in Kosovo / P. Bytyqi et al. *Journal of Freshwater Ecology*. 2020. № 35. P. 105–121.
4. Aquatic macrophytes as biological indicators of environmental conditions of rivers in north-eastern Spain / M. Onaindia et al. *Annales De Limnologie-international Journal of Limnology*. 2005. № 41. P. 175–182.
5. Han Z., Cui B. Performance of macrophyte indicators to eutrophication pressure in ponds. *Ecological Engineering*. 2016. № 96. P. 8–19.
6. Dhir B. Chapter 4 – Biotechnological Tools for Remediation of Acid Mine Drainage (Removal of Metals from Wastewater and Leachate). *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* Majeti Narasimha Vara Prasad et al. (Eds.). 2018. P. 67–82. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/macrophytes> (дата звернення: 10.12.2022).
7. Effects of Water Quality Adjusted by Submerged Macrophytes on the Richness of the Epiphytic Algal Community / T. Lv et al. *Frontiers in Plant Science*. 2019. № 9.
8. Bhatta K., Patra H.K. A review on aquatic macrophytes as bio indicators of Water Quality of Lakes. *Eco. Env. & Cons.* 2020. № 26 (3). P. 1158–1161.
9. A new method to assess water trophy and organic pollution – the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): its application to different types of river and pollution / J. Hauray et al. *Hydrobiologia*. 2006. № 570. P. 153–158.
10. Exploring the use of Macrophytes as Biological Indicators for Organic Pollution of Chanchaga River in North Central Nigeria / A. Ali et al. *Pollution*. 2021. № 7 (4). P. 859–870.
11. Background to aquatic macrophytes, collecting data along a belt transect. URL: [https://environment.des.qld.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0027/90783/biological-assessment-background-to-aquatic-macrophytes-collecting-data-along-a-belt-transect.pdf](https://environment.des.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0027/90783/biological-assessment-background-to-aquatic-macrophytes-collecting-data-along-a-belt-transect.pdf) (дата звернення: 10.12.2022).
12. Макрофіти – індикатори змін природного середовища : підручник / Д.В. Дубина та ін. Київ : Наукова думка, 1993. 435 с.
13. Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних факторів. АН України. Ін-т ботаніки ім. М.Г. Холодного : монографія. Київ : Наукова думка, 1994. 280 с.
14. Рослинність і бактеріальне населення Дніпра та його водосховищ / Л.А. Сіренко та ін. Київ : Наукова думка, 1989. 232 с.
15. Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко та ін. Київ : ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с.
16. Класифікація рослинності та біотопів України : матеріали Четвертої науково-теоретичної конференції / за ред. Я.П. Дідуха. Київ, 2020. 149 с.
17. Дубина Д.В. Класифікація вищої водної рослинності України: стан та перспективи. *Український фітоценологічний збірник*. 1996. Сер. А. Вип. 3. С. 6–14.
18. Никифоров В.В. Гідроботанічний аналіз водосховищ Середнього Придніпров'я. *Вісник Дніпровського університету*. 2002. Т. 2. Вип. 10. С. 188–193.
19. Машинне навчання. URL: [uk.wikipedia.org/wiki/Машинне\\_навчання](http://uk.wikipedia.org/wiki/Машинне_навчання) (дата звернення: 10.12.2022).
20. Вступ до програмування мовою C++. Організація обчислень : навальний посібник / Ю.А. Белов та ін. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2012. 175 с.
21. Варенко В.М. Інформаційно-аналітична діяльність : навчальний посібник. Київ : Університет «Україна», 2014. 417 с.
22. Modern Aspects of Software Development: Proceedings of VII Scientific and Practical Virtual Conference of Software Development Specialists, June, 1 2020 р. Kyiv : Igor Sikorsky KPI, 2020. 83 p. URL: <http://araps.kpi.ua/downloads/sarpo-2020/sarpo%202020%20FULL.pdf> (дата звернення: 10.12.2022).
23. Найкращі засоби та платформи розробки програмного забезпечення, які повинен знати розробник. URL: <https://uk.myservername.com/20-best-software-development-tools> (дата звернення: 10.12.2022).
24. Як створити додаток в конструкторі mo-apps. URL: <https://mo-apps.com/uk-UA/Faq> (дата звернення: 10.12.2022).
25. Никифоров В.В. Результати гідрохімікобіологічного аналізу та біотестування природних вод акваторії проєктованого РЛП «Кременчуцькі плавні». *Вісник Харківського політехнічного університету*. 2000. Т. 77. С. 3–7.

## A NEW METHOD OF AQUATIC ECOSYSTEMS PHYTOINDICATION

### Volodymyr Nykyforov

Doctor of Biological Sciences, Professor at the Department of Ecology and Biotechnology  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Universytetska str., Kremenchuk, Ukraine, 39600,  
volnyk2015@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8917-2340

### Sergii Digtar

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Ecology and Biotechnology  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Universytetska str., Kremenchuk, Ukraine, 39600,  
sergiusvictor@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6872-2865

### Oksana Sakun

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Ecology and Biotechnology  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Universytetska str., Kremenchuk, Ukraine, 39600,  
oksanaansakun@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1573-4333

### Roman Vysych

Master of the Department of Ecology and Biotechnology

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Universytetska str., Kremenchuk, Ukraine, 39600

### Maria Plahotna

10-B grade student

Kremenchuk Lyceum № 10 “Linguist”, 8 Leytenanta Pokladova str., Kremenchuk, Ukraine, 39600

Based on the established criteria for assessing the ecological state of water bodies, a software product was developed and tested for the first time, which makes it possible to calculate the chemical composition of water in different types of reservoirs (the content of 10 ions common in water) and other parameters (hardness, pH, total mineralization, coefficients of occurrence, rarity and biological diversity of species). A database of hydrochemical and hydrobotanical data (characteristics of typical macrophytes and the chemical composition of aquatic ecosystems in which they settle) was created based on the literature data. It was determined which macrophytes are indicators of certain indicators of water quality (increased acidity, chloride content, pollution with heavy metals, nitrogenous compounds, calcium, etc.). The identified species-indicators of organic water pollution are distributed in accordance with the water trophicity system. A comparative analysis of real (determined by chemical methods) and virtual (determined by ecological methods) data on the concentration of leading ions in two locations of the Kamianske reservoir was carried out, the results of which indicate the reliability of the data obtained using a new method of hydrophytoindication in the water area of the regional landscape park. The developed computer information system “Monitoring the ecological state of water bodies” makes it possible to predict the state of various water ecosystems based on a comparative analysis of the hydrochemical regime of the tested water bodies and generate an ecological passport for them, which is important for maintaining the state cadastre of water resources. In the near future, it is planned to develop a mobile application, thanks to which everyone can find out the quality of water in a reservoir of interest to him.

**Key words:** phytoindication, aquatic ecosystems, macrophytes, software, water quality, monitoring.

## REFERENCES

1. Pereira, S.A., Trindade, C.R., Albertoni, E.F., & Palma-Silva, C. (2012). Aquatic macrophytes as indicators of water quality in subtropical shallow lakes, Southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 24, 52–63. DOI: 10.1590/S2179-975X2012005000026 [in English].
2. Indicators: Macrophytes [Online], available at: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-macrophytes> (Accessed 10 Dec 2022) [in English].
3. Bytyqi, P., Czikkely, M., Shala-Abazi, A., Fetoshi, O., Ismaili, M., Hyseni-Spahiu, M., Ymeri, P., Kabashi-Kastrati, E., & Millaku, F. (2020). Macrophytes as biological indicators of organic pollution in the Lepenci River Basin in Kosovo. *Journal of Freshwater Ecology*, 35, 105–121. DOI: 10.1080/02705060.2020.1745913 [in English].
4. Onaindia, M., Amezaga, I., Garbisu, C., & García-Bikuña, B. (2005). Aquatic macrophytes as biological



indicators of environmental conditions of rivers in north-eastern Spain. *Annales De Limnologie-international Journal of Limnology*, 41, 175–182. DOI: 10.1051/limn:20054130175 [in English].

5. Han, Z., & Cui, B. (2016). Performance of macrophyte indicators to eutrophication pressure in ponds. *Ecological Engineering*, 96, 8–19 [in English].

6. Dhir, B. (2018). Chapter 4 – Biotechnological Tools for Remediation of Acid Mine Drainage (Removal of Metals From Wastewater and Leachate). In Majeti Narasimha Vara Prasad, Paulo Jorge de Campos Favas & Subodh Kumar Maiti (Eds.). *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 67–82) [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/macrophytes> (Accessed 10 Dec 2022) [in English].

7. Lv, T., He, Q., Hong, Y., Liu, C., & Yu, D. (2019). Effects of Water Quality Adjusted by Submerged Macrophytes on the Richness of the Epiphytic Algal Community. *Frontiers in Plant Science*, 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.01980 [in English].

8. Bhatta, K., & Patra, H.K. (2020). A review on aquatic macrophytes as bio indicators of Water Quality of Lakes. *Eco. Env. & Cons.*, 26 (3), 1158–1161 [in English].

9. Haury, J., Peltre, M.C., Trémolières, M., Barbe, J., Thiébaud, G., Bernez, I., Daniel, H., Chatenet, P., Haan-Archipof, G., Muller, S., Dutartre, A., Laplace-Treyture, C., Cazaubon, A., & Lambert-Servien, E. (2006). A new method to assess water trophy and organic pollution – the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): its application to different types of river and pollution. *Hydrobiologia*, 570, 153–158. DOI: 10.1007/s10750-006-0175-3 [in English].

10. Ali, A., Obi-Iyeke, G., Keke, U., & Arimoro, F. (2021). Exploring the use of Macrophytes as Biological Indicators for Organic Pollution of Chanchaga River in North Central Nigeria. *Pollution*, 7 (4), 859–870. DOI: 10.22059/POLL.2021.323765.1087 [in English].

11. Background to aquatic macrophytes, collecting data along a belt transect [Online], available at: [https://environment.des.qld.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0027/90783/biological-assessment-background-to-aquatic-macrophytes-collecting-data-along-a-belt-transect.pdf](https://environment.des.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0027/90783/biological-assessment-background-to-aquatic-macrophytes-collecting-data-along-a-belt-transect.pdf) [in English].

12. Makrofity – indykatory zmin pryrodnoho seredovyschcha : pidruchnyk [Macrophytes are indicators of changes in the natural environment] / D.V. Dubyna ta in. Kyiv : Naukova dumka, 1993. 435.

13. Didukh Ya.P., Pliuta P.H. Fitoindykatsiia ekolohichnykh faktoriv. AN Ukrainy. In-t botaniky im. M.H. Kholodnoho : monohrafiia [Phytoindication of environmental factors. Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv : Naukova dumka, 1994. 280.

14. Roslynnist i bakterialne naseleння Dnipra ta yoho vodoshkovyshch [Vegetation and bacterial population of the Dnipro and its reservoirs] / L.A. Sirenko ta in. Kyiv : Naukova dumka, 1989. 232.

15. Natsionalnyi katalog biotopiv Ukrainy [National catalog of biotopes of Ukraine] / za red. A.A. Kuzemko, Ya.P. Didukha, V.A. Onyshchenka, Ya. Sheffera. Kyiv : FOP Klymenko Yu.Ya., 2018. 442.

16. Klyasyfikatsiia roslynnosti ta biotopiv Ukrainy : materialy chetvertoi naukovo-teoretychnoi konferentsii [Classification of vegetation and biotopes of Ukraine] / za red. akad. NAN Ukrainy Ya.P. Didukha. Kyiv, 2020. 149.

17. Dubyna, D.V. Klyasyfikatsiia vyshchoi vodnoi roslynnosti Ukrainy: stan ta perspektyvy [Classification of higher aquatic vegetation of Ukraine: state and prospects]. *Ukr. fitotsen. zb.* [Ukrainian phytocenological collection]. 1996. A, 3, 6–14. [in Ukrainian].

18. Nykyforov, V.V. Hidrobotanichniy analiz vodoshkovyshch Sereдного Prydniprov'ia [Hydrobotanical analysis of reservoirs of the Middle Dnieper region]. *Visnyk Dniprovskoho universytetu* [Bulletin of Dnipro University]. 2002. T. 2, 10, 188–193 [in Ukrainian].

19. Mashynne navchannia [Machine learning]. URL: [uk.wikipedia.org/wiki/Машинне\\_навчання](http://uk.wikipedia.org/wiki/Машинне_навчання) (data zvernennia: 10.12.2022) [in Ukrainian].

20. Bielov, Yu.A., Karnaukh, T.O., Koval, Yu.V., Stavrovskiy, A.B. Vstup do prohramuvannia movoiu S++. Orhanizatsiia obchyslen : navch. posib. [Introduction to C++ programming. Organization of calculations]. Kyiv : Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr “Kyivskiy universytet”, 2012. 175 [in Ukrainian].

21. Varenko, V.M. Informatsiino-analitychna diialnist : navch. posib. [Information and analytical activity]. Kyiv : Universytet “Ukraina”, 2014. 417 [in Ukrainian].

22. Modern Aspects of Software Development: Proceedings of VII Scientific and Practical Virtual Conference of Software Development Specialists, June, 1 2020 p. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2020. 83 p. [Online], available at: <http://apeps.kpi.ua/downloads/sarpo-2020/sarpo%202020%20FULL.pdf> (Accessed 10 Dec 2022) [in English].

23. Naikrashchi zasoby ta platformy rozrobky prohramnoho zabezpechennia, yaki povynen znaty rozrobnyk [The best software development tools and platforms a developer should know]. URL: <https://uk.myservname.com/20-best-software-development-tools> (data zvernennia: 10.12.2022) [in Ukrainian].

24. Yak stvoryty dodatok v konstruktori mo-apps [How to create an application in the mo-apps designer]. URL: <https://mo-apps.com/uk-UA/Faq> (data zvernennia: 10.12.2022) [in Ukrainian].

25. Nykyforov, V.V. Rezultaty hidrokhimikobiolohichnoho analizu ta biotestuvannia pryrodnykh vod akvatorii proiekтованого RLP «Kremenchutski plavni» [Results of hydrochemical-biological analysis and biotesting of natural waters in the water area of the projected Kremenchutskiy plavni RLP]. *Visnyk Kharkivskoho politekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kharkiv Polytechnic University]. 2000, 77, 3–7 [in Ukrainian].

Стаття надійшла 24.04.2023