

**ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА  
ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ**

УДК 574.5:004.932

**Т.О. Єльнікова, асист.***Житомирський державний технологічний університет***АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСІВ  
ЄВТРОФІКАЦІЇ У ВОДОЙМАХ ГОСПОДАРСЬКО-ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА  
ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ***(Представлено д.т.н., проф. Мельничуком П.П.)*

*Розглянуто можливості застосування комп'ютеризованих технологій для автоматизованої обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей (евтрофікацію) у водоймах господарсько-побутового призначення. Початковими даними для дослідження процесів евтрофікації є відеозображення проб води, які використовуються для визначення геометричних ознак, чисельності й біомаси водоростей. Для комп'ютеризованої обробки вимірювальної інформації пропонуються методи цифрової обробки відеозображень та математичний апарат штучних нейронних мереж.*

**Вступ.** Евтрофікація, тобто продукування органічної речовини у водному об'єкті під дією зовнішніх і внутрішньоводних факторів, є однією з серйозних екологічних проблем. Евтрофікації піддаються майже всі водні об'єкти, однак найбільш евтрофікація проявляється у водосховищах, що мають обмежену циркуляцію води. Евтрофікація водойм являє собою природний процес. Його розвиток оцінюється геологічним масштабом часу. Однак в результаті антропогенного надходження біогенних речовин у водні об'єкти відбувається різке прискорення евтрофікації [1]. Цей процес призводить до надмірного розвитку водоростей та подальшого забруднення водоймищ при їх відмиранні. Збільшення біомаси водоростей до 100 мг/дм<sup>3</sup> супроводжується значним зменшенням виділення кисню водоростевими клітинами та зниженням його концентрації у воді. Це, в свою чергу, різко прискорює відмирання водоростей і надходження у воду органічних, у тому числі отруйних речовин – продуктів розкладу. При відмиранні водоростей якість води може настільки погіршуватися, що вона стає непридатною для питного водозабезпечення. Крім того, деякі водорості надають воді неприємного присмаку та запаху [1]. Це ускладнює вирішення завдання стійкого та якісного водозабезпечення. Таким чином, виникає необхідність контролю за станом водойм санітарно-побутового призначення та розробки відповідних методик контролю за процесами евтрофікації. Важливим завданням постає і подальший прогноз динаміки процесів евтрофікації водойм, що є на даний час досить актуальним.

Питання вивчення та моделювання процесів сезонного розвитку водоростей у водоймах розглядаються в ряді наукових праць [2–4]. Основою таких досліджень є методики відбору проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистеми водойми [5]. Дані методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, підрахунок кількості водоростей, визначення їх розмірів та подальший розрахунок потрібних показників. Вони мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних насамперед з використанням ручної праці для ряду операцій.

За допомогою вимірювання, дослідження та моделювання процесів, що характеризують розвиток біологічних об'єктів, можна контролювати чисельність водоростей і їх біомасу, а також прогнозувати інтенсивність розвитку водоростей та загальний стан екосистеми водоймищ. Таким чином, вивчення і дослідження процесів евтрофікації є важливою складовою частиною контролю за станом екосистем водойм господарсько-побутового призначення.

Методом даної роботи є використання цифрової обробки відеозображень та математичного апарата штучних нейронних мереж для дослідження процесів евтрофікації у водоймах господарсько-побутового призначення, а також розробка відповідних алгоритмів обробки вимірювальної інформації про ці процеси.

**Характеристика форм тіла водоростей.** Основним змістом вимірювальної інформації, яку можна отримати при візуальному дослідженні проб вод з водойми, є геометричні характеристики водоростей та їх чисельність. Ця інформація в подальшому використовується для визначення видового складу водоростей шляхом класифікації та розрахунку їх біомаси, що є важливим для оцінки стану екосистеми водойм господарсько-побутового призначення. Тому розглянемо можливі геометричні форми тіла водоростей різних видів, що зустрічаються в пробах води.

За формою тіла водорості поділяють на такі основні типи: амебоїдний (ризоподіальний), монадний (джгутиковий), гемімонадний (палмелоїдний), коккоїдний, нитчастий (трихальний), різнонитчастий

(гетеротрихальний), псевдопаренхіматозний (ложнотканевий), тканевий (паренхіматозний), сифональний та сифонокладальний [1].

Амебоїдний тип характеризується непостійною формою тіла, що окреслене клітковими оболонками, і здатністю до руху, подібного до амеби. До цього типу належать деякі представники динофітових, золотистих і жовто-зелених водоростей.

Монадний (джгутиковий) тип будови тіла притаманний одноклітинним і колоніальним організмам, які мають міцну кліткову оболонку і один або декілька джгутиків. При утворенні колоній окремі клітини монадної будови об'єднуються шляхом покриття слизом або розростання оболонки. Цей тип будови присутній у багатьох видів динофітових, евгленових, криптофітових, золотистих, жовто-зелених і зелених водоростей.

Гемімонадну (палмелоїдну) структуру мають одноклітинні й колоніальні форми водоростей, які втратили джгутики і псевдоподії, а разом з ними і можливість активно пересуватися у вегетативному стані. Вони мають міцну оболонку і здатні прикріплюватися до поверхні твердих матеріалів. Така будова є характерною для деяких зелених, жовто-зелених і золотистих водоростей.

Коккоїдну будову тіла мають одноклітинні й колоніальні форми, покриті міцною оболонкою, у яких відсутні джгутики і псевдоподії. Водорості такої будови нерухливі у вегетативному стані, за виключенням діатомових та десмідієвих. Така будова є характерною переважно для діатомових та жовто-зелених, рідше – для динофітових і криптофітових. Евгленових і синьо-зелених водоростей з такою формою тіла немає.

Нитчаста структура утворюється із багатьох клітин, що з'єднані у формі ниток, які можуть бути прямими і розгалуженими. Вона зустрічається у вільноплаваючих та прикріплених водоростей, покритих слизом або без нього. Це – одна із найбільш поширених форм серед водоростей різних систематичних груп: синьо-зелених, зелених, жовто-зелених, червоних. Рідше зустрічаються у золотистих і динофітових.

Різномитчаста структура є похідною від нитчастої. Вона виникла в результаті морфологічних перетворень та отримання шаровищами (тілами водоростей) можливості горизонтального поширення та прикріплення до твердих субстратів. Такі утворення здатні підніматися вертикально, виконуючи функцію вегетативного розмноження. Горизонтальне і вертикальне розгалуження є характерним для багатьох видів синьо-зелених, золотистих і бурих водоростей.

Псевдопаренхіматозний тип будови характеризується утворенням крупних тіл в результаті розростання ниток розгалуженого різномитчастого шаровища.

Значно рідше зустрічається у водоростей тканева (паренхіматозна) структура тіла. Вона виникає в результаті ділення клітин у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Такий тип будови характерний для бурих водоростей, наприклад ламінарій. Рідше він зустрічається у червоних водоростей.

Сифональна будова характеризується відсутністю всередині шаровищ кліткових перегородок і наявністю значної кількості ядер. Шаровище може розростатися на декілька десятків сантиметрів, утворюючи різної форми кустоподібні розгалуження або кулеподібні структури. Така форма тіла зустрічається у прісноводних зелених і жовто-зелених водоростей.

Сифонокладальний тип будови характеризується складною структурою шаровища, що складається з первинно-багатоядерних сегментів, притаманних лише зеленим водоростям.

Наведені геометричні характеристики можуть бути використані для класифікації водоростей за видовим складом.

**Методики контролю та дослідження процесів евтрофікації.** Опрацювання проб води з водоростями в лабораторії (камеральне опрацювання) складається з декількох етапів.

Першим етапом є якісний аналіз проби, який дозволяє провести систематичну ідентифікацію водоростей на всіх рівнях систематичної ієрархії, відомої з гідробіології: “відділ–клас–порядок–родина–рід–вид”.

Кількісний аналіз (другий етап) починається з підрахування чисельності й біомаси кожного виду водоростей. У подальшому підраховується загальна чисельність та біомаса водоростей кожного систематичного відділу. У гідроекологічних дослідженнях для опрацювання проб використовуються світлові мікроскопи різних марок. Найбільш розповсюдженим є мікроскопи марки МБИ, основна вимога до яких – це велике збільшення (близько  $100^{\times}$  ...  $200^{\times}$ ) [6].

Підрахунок чисельності водоростей проводять у спеціальних лічильних камерах. При відсутності камер підрахунок водоростей можна проводити на скляних пластинах (предметних склах), розграфлених для зручності й більшої точності підрахунку кількості водоростей на смуги та квадрати. Основна вимога – це точне дозування об'єму проби, що наноситься на пластину. Для цього використовують спеціальні штемпель-піпетки, розраховані на фіксований об'єм, що складає як правило  $0,1 \text{ см}^3$  [5].

Перед початком підрахунків проба добре перемішується, наноситься на дно камери, щільно прикривається покривним склом і розміщується під мікроскопом.

Фітопланктон розраховується в рахунковій камері Нажотта об'ємом  $0,02 \text{ см}^3$  та кількістю смуг 40. Розрахунок клітин у пробі розраховується за формулою:

$$N = \frac{n \cdot b \cdot k}{V},$$

де  $N$  – число клітин фітопланктону в  $1 \text{ см}^3$  води;

$n$  – число клітин, знайдених при рахунковій камері;

$b$  – об'єм концентрату,  $\text{см}^3$ ;

$k$  – коефіцієнт камери з урахуванням числа визначених смуг;

$V$  – об'єм проби,  $\text{см}^3$ .

Чисельність водоростей визначається розрахунковим методом, а біомаса – розрахунково-об'ємним. Необхідною умовою для цього є наявність даних з чисельності конкретного виду водоростей у пробі води та лінійні розміри клітин водоростей цього виду [1, 2].

Для вимірювань розмірів водоростей їх порівнюють до певних геометричних тіл, що є найбільш подібними до даної морфологічної форми: куля, паралелепіпед, циліндр, конус тощо. Далі проводять вимірювання необхідних параметрів: радіус, діаметр, висота, довжина тощо.

Вимірювання розмірів водоростевих клітин виконується за допомогою окуляр-мікрометра з вимірювальною лінійкою, що входить до комплекту засобів мікроскопа. Ціну поділок лінійки окуляр-мікрометра визначають за допомогою об'єкт-мікрометра (предметне скло з нанесеною на нього лінійкою, ціна кожної поділки  $10 \text{ мкм}$ ).

Для отримання репрезентативних даних необхідно провести вимірювання лінійних розмірів не менше як 30 водоростевих клітин одного виду. Отримані дані необхідно опрацювати статистично.

Визначення об'єму клітин проводять за відомими геометричними формулами на основі отриманих лінійних розмірів конкретної водорості, подібної до даної геометричної фігури. Іноді користуються табличним методом за вже визначеними розмірами та відповідними їм об'ємами водоростевих клітин, що є в даній лабораторії, або опубліковані в літературі.

Відносну щільність (до води) прісноводних водоростей приймають за  $1,00$ – $1,05$ . Виразувану біомасу водоростей кожного виду множать на їх чисельність і приводять у  $\text{мг/дм}^3$  або  $\text{г/м}^3$  [1, 2].

Якщо по вертикалі водойми була відібрана серія проб з інтервалом в  $1 \text{ м}$ , то біомасу в  $\text{г/м}^2$  знаходять як середню арифметичну величину. Для випадку, коли відстані по вертикалі були неоднакові, біомасу в  $\text{г/м}^2$  розраховують як середньозважену величину за формулою:

$$B_{\Sigma} = B_1 l_1 + B_2 l_2 + \dots + B_n l_n,$$

де  $B$  – біомаса водорості ( $\text{мг/дм}^3$  чи  $\text{г/м}^3$ ) з певного горизонту;

$l$  –  $1/2$  проміжку (в метрах) між горизонтами, де були відібрані проби водоростей.

Використання водоростей як біологічного індикатора, що характеризує сучасний стан водної екосистеми та зміни, викликані антропогенним впливом, можливе лише при отриманні кількісних показників розвитку водоростевих угруповань, а результати камерального опрацювання відібраних проб дозволяють встановити основні показники видового та кількісного різноманіття [3, 5].

З вищесказаного видно, що процес відбору проб, їх зберігання, ручна обробка, а також сам розрахунок геометричних параметрів біологічних об'єктів є досить трудомістким, і потребує великих затрат часу. Використовуючи сучасне обладнання, можна отримати оцифроване відеозображення біологічних об'єктів, а автоматизувавши процес вивчення геометричних ознак водоростей, можна визначити інтегральні показники процесів розвитку водоростей, встановити їх вид, і проаналізувати стан екосистеми водоймища.

Для того, щоб отримати якісне відеозображення певного біологічного об'єкта, необхідно використовувати цифровий фотоапарат або цифрову відеокамеру. Шляхом обробки цих відеозображень можна отримати вимірювальну інформацію про геометричні ознаки біологічних об'єктів і визначити показники розвитку водоростей певного типу у водоймищах. Саме ці показники і є початковими даними для побудови математичної моделі, яка дозволить прогнозувати розвиток водоростей та управляти даним процесом.

У наш час існують універсальні програми обробки відеозображень, отриманих за допомогою сучасних мікроскопів та відеокамер, але в них відсутнє врахування особливостей задачі, що розглядається. Тому потрібно визначити набір та параметри процедур обробки відеозображень, що дозволяють вимірювати геометричні ознаки водоростей у пробах води та визначити засоби об'єднання їх із процедурами розрахунку інтегрованих показників стану екосистеми водоймища.

Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень водоростей забезпечує автоматизацію процесу досліджень, розширює функціональні можливості та підвищує оперативність засобів вимірювання геометричних ознак біологічних об'єктів у пробах води. Зображення водоростей, отримані після фільтрації шумів та сегментації, класифікуються на основі їх геометричних ознак, які можна визначити за відеозображеннями. В результаті визначається належність кожного

екземпляра водоростей до одного з видів та розраховуються інтегральні показники стану екосистеми водоймища.

Методика визначення показників розвитку водоростей на основі комп'ютеризованих технологій обробки вимірної інформації полягає у наступному: відбір і підготовка проб води з водоростями з контрольних точок водойми; формування цифрового відеозображення за допомогою мікроскопа та пристрою формування відеозображень; введення відеозображень в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ; цифрова обробка відеозображень з метою вимірювання кількісних показників, геометричних ознак, об'єму і біомаси водоростей; розрахунок інтегральних показників розвитку водоростей; прогноз динаміки процесів евтрофікації у водоймі.

Обробка відеозображень включає сегментацію відеозображень на об'єкти (водорості) й фон за методом кольорової сегментації або на основі застосування штучних нейронних мереж; видалення шумів і виключення неоднорідностей об'єктів; видалення об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; заповнення порожнин в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення. Вибір об'єктів можна проводити як в автоматичному, так і в ручному режимі, коли оператор безпосередньо на екрані монітора вказує опорні точки об'єктів на відеозображенні.

**Застосування штучних нейронних мереж для обробки вимірної інформації про процеси евтрофікації.** Алгоритми обробки вимірної інформації на основі математичного апарату штучних нейронних мереж [7, 8] можуть бути застосовані для вирішення наступних задач при дослідженні процесів евтрофікації: сегментація відеозображень водоростей; класифікація водоростей за видовим складом на основі геометричних ознак; прогнозування процесів евтрофікації і їх контроль.

Найбільш поширений метод сегментації цифрових відеозображень – це сегментація на основі порогу яскравості. Для кольорових відеозображень сегментація виконується шляхом перетворення кольорового відеозображення у напівтонове або шляхом визначення відстані між значеннями кольору дискретних точок в кольоровому просторі, наприклад в просторі RGB або HSV [9, 10].

Застосування цих методів до відеозображень водоростей не завжди можливе через ряд особливостей цих відеозображень. Наприклад слід враховувати, що яскравість і колір водоростей можуть дещо змінюватися навіть в межах одного відеозображення, яскравість і колір водоростей досить часто мало відрізняються від яскравості і кольору фону. Тому пропонується сегментацію відеозображень водоростей виконувати на основі застосування штучних нейронних мереж.

Для виділення об'єктів на відеозображенні використовувалася нейронна мережа на основі прошарку нейронів Кохонена (прошарку нейронів, що змагаються). Така нейронна мережа забезпечує виділення центрів кластерів для масиву початкових даних. В даному випадку кольорове відеозображення водоростей перетворюється з колориметричної системи RGB в HSV або Lab. Далі на відеозображенні обирається фрагмент, який є характерним для даного відеозображення і який використовується для навчання нейронної мережі. При цьому в кольоровому просторі HSV або Lab обробляється інформація про колір дискретних точок фрагмента відеозображення і визначаються центри кластерів, що відповідають кольору об'єктів (водоростей) і фону. Кількість кластерів визначається на етапі навчання нейронної мережі й повинна бути узгоджена з видовими ознаками водоростей. Після закінчення етапу навчання нейронна мережа виконує сегментацію цифрових кольорових відеозображень водоростей.

Зображення водоростей, отримані після фільтрації шумів та сегментації, потрібно класифікувати, тобто визначити належність кожного екземпляра водорості до одного з видів, відомих з гідробіології. Така класифікація може бути виконана на основі ознак об'єктів, які можна визначити за їх відеозображеннями. Відомі багато підходів до класифікації об'єктів за їх відеозображеннями [10], наприклад методи на основі наборів деяких ознак або структурно-синтаксичні методи. Але найбільш перспективним слід вважати методи класифікації, що базуються на використанні штучних нейронних мереж [7]. Нейромережевий підхід особливо ефективний у задачах класифікації з тієї причини, що він поєднує у собі здатність комп'ютера до обробки чисел і здатність мозку до узагальнення і розпізнавання. В даному випадку базовим набором ознак водоростей, що класифікуються, є геометричні ознаки, визначені за відеозображеннями. Ці ознаки попередньо визначаються для еталонних зображень водоростей певних видів і використовуються для навчання нейронної мережі.

Сформульованим вимогам відповідає набір геометричних ознак, що вимірюються безпосередньо за відеозображенням або розраховуються на основі інших геометричних ознак:

- поперечні розміри  $w$  і  $h$  та площа  $S$  об'єкта (водорості);
- коефіцієнт випуклості:  $k_c = S / S_c$ , де  $S_c$  – випукла площа об'єкта (площа випуклого багатокутника, в який вписано об'єкт);
- коефіцієнт заповнення:  $k_f = S / (w \cdot h)$ ;
- ексцентриситет еліпса, який має моменти і осі інерції такі ж, як і у об'єкта.

Останні три ознаки також називаються коефіцієнтами форми геометричних об'єктів.

В табл. 1 наведено приклад порівняння геометричних ознак для водоростей трьох різних видів. *Euglena proxima* має монадний тип будови тіла та шароподібну геометричну форму, *Volvox globator* –

монадний тип будови тіла та еліпсоподібну геометричну форму, Ulotrix – нитчастий тип будови тіла та тонку витягнуту в довжину геометричну форму. На основі отриманих даних можна зробити висновок про те, що коефіцієнти форми можуть бути використані для класифікації і визначення видового складу водоростей у пробах води.

Таблиця 1

Порівняння значень геометричних ознак для різних видів водоростей

Коефіцієнти форми	Вид водоростей		
	Euglena proxima	Volvox globator	Ulotrix
1. Коефіцієнт випуклості	0,975	0,991	0,882
2. Коефіцієнт заповнення	0,739	0,763	0,218
3. Ексцентриситет	0,793	0,234	0,987

Крім задач класифікації, нейронна мережа може бути використана для пошуку залежностей у даних, що описують динаміку процесів евтрофікації у водоймах господарсько-побутового призначення. Нейромережа здатна знайти складні сховані залежності в даних, що не виявляються стандартними статистичними методами. Також в даному випадку важливі задачі прогнозування розвитку водоростей та визначення заходів, що сприяють поліпшенню якості питної води.

**Висновки.** Досліджено застосування комп'ютеризованих технологій для обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей (евтрофікацію) у водоймах господарсько-побутового призначення. Розроблено методику визначення геометричних ознак водоростей за відеозображенням проб води з водойм. На основі цих результатів проводиться ідентифікація водоростей за видовим складом та визначаються показники, що характеризують стан екосистеми водоймища. Для комп'ютеризованої обробки вимірювальної інформації пропонуються методи цифрової обробки відеозображень та математичний апарат штучних нейронних мереж.

Результати обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей мають практичне значення та практичне застосування. Вони можуть бути використані при проведенні деєвтрофікаційних заходів у водоймах господарсько-побутового призначення, а також при детоксикації води.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии: Учебник для вузов. – К.: Генеза, 2004. – 664 с.
2. Топачевский А.В., Масюк Н.П. Пресноводные водоросли Украинской ССР. – К.: Выща школа, 1981. – 333 с.
3. Хоружая Т.А. Методы оценки экологической опасности. – М.: Экспертное бюро – М, 1998. – 224 с.
4. Васер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. Водоросли: Справочник. – К.: Наукова думка, 1989. – 608 с.
5. Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем / За ред. В.І. Назаренко. – Київ, 2002. – 48 с.
6. Князев В.С., Кононова И.Б. Руководство к лабораторным занятиям по общей петрографии: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1991. – 128 с.
7. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2001. – 382 с.
8. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. – М.: Мир, 1992. – 127 с.
9. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
10. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.

ЄЛЬНІКОВА Тетяна Олександрівна – асистент кафедри природничих наук Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- екологія та гідробіологія;
- математичне моделювання екологічних систем.

Подано 14.06.2007