

**ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ**

УДК 004.932:574.5

**Е.О. Аристархова, к. біолог. н., доц.
Ю.О. Подчашинський, к.т.н., доц.
Т.О. Шавурська, асист.***Житомирський державний технологічний університет***ВИЗНАЧЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПОКАЗНИКІВ РОЗВИТКУ ВОДОРОСТЕЙ У ВОДОСХОВИЩАХ
НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ**

Розглянуто можливості застосування цифрової обробки відеозображень для визначення і моделювання показників розвитку водоростей у водосховищах господарсько-побутового призначення. Цифрова обробка відеозображень планктонних водоростей, відібраних з вододжерел, дозволяє визначити їх кількість і вимірювати геометричні характеристики. На основі цих результатів можна удосконалити проведення ідентифікації водоростей за видовим складом та визначити показники, що характеризують стан водних екосистем.

Постановка проблеми. Одним з найважливіших показників середовища, який здатен впливати на розвиток прісноводних водоростей, є надходження у водойми біогенів у формі органічних та мінеральних сполук. Відомо, що між здатністю водоростей до накопичення біогенних елементів (головним чином нітрогену і фосфору) та інтенсивністю їх розмноження існує високий прямолінійний корелятивний зв'язок [1]. Тому зі збільшенням цих елементів у водних екосистемах створюються найкращі умови для масового розвитку планктонних водоростей, що може стати причиною евтрофікації. Оскільки потенційні можливості водоростей до розмноження є досить високими, вказаний процес здатен дуже швидко виходити з-під контролю і досягати катастрофічних масштабів. Стан водних екосистем при цьому суттєво змінюється, що в кінцевому рахунку призводить до значного погіршення якості води [5], [10].

До основних ознак евтрофікації водойм належать: значне збільшення біомаси водоростей (0,5–100 мг/дм³), масовий розвиток водоростей до рівнів “цвітіння” води, зменшення концентрації розчиненого кисню на заключному етапі вегетації, коли починається відмирання основної частини водоростей [1], [5].

Внаслідок евтрофікації можуть виникати суттєві порушення в централізованому водопостачанні. Так, інтенсивне “цвітіння” водосховищ призводить до того, що питна вода не тільки набуває неприємного смаку та запаху, але й у результаті виділення отруйних метаболітів водоростей стає по суті токсичною [6], [8].

В зв'язку з цим у водоймах господарсько-побутового водокористування необхідно забезпечити ретельний контроль за основними циклами розмноження водоростей. Також існує необхідність розробки заходів щодо ефективної боротьби з “цвітінням” води. Крім водосховищ це актуально і для водойм, які мають обмежену циркуляцією води.

Негативні наслідки, що спричиняються народному господарству масовим розвитком водоростей, можна зменшити, якщо передбачити їх заздалегідь. Математичне моделювання процесів, що характеризують збільшення чисельності водоростей та їх біомаси, дозволить скласти прогнози щодо інтенсивності розвитку водоростей та їх впливу на стан забруднення водойм. Методи математичного моделювання також нададуть можливість своєчасно планувати та виконувати необхідні деєвтрофікаційні заходи, тобто заходи, спрямовані на обмеження кількості водоростей у водоймах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вивчення та моделювання процесів сезонного розвитку водоростей у водоймах розглядаються в ряді наукових праць [2], [3], [4], [9]. Основою таких досліджень є методики відбору проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистемі водойми [6]. Однак вказані методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, ручний підрахунок кількості водоростей, визначення їх розмірів та подальший розрахунок потрібних показників. Вказані методики мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з використанням ручної праці.

Існують універсальні програми обробки відеозображень, отриманих за допомогою сучасних мікроскопів та відеокамер [7], але в них відсутнє врахування особливостей задачі, що розглядається. Тому потрібно визначити набір та параметри процедур обробки відеозображень, що дозволять вимірювати характеристики водоростей у пробах води та визначити засоби об'єднання їх з процедурами моделювання та прогнозу стану екосистемі водоймища. Також потрібно сформулювати вимоги до

апаратних засобів формування відеозображень, які дозволять визначати потрібні показники із заданою точністю.

Метою даної статті є дослідження можливостей та розробка методики застосування цифрової обробки відеозображень для визначення показників розвитку водоростей у водоймищах. Ці показники є початковими даними для побудови математичної моделі, яка дозволить прогнозувати розвиток водоростей та управляти даним процесом.

Викладення основного матеріалу. Для побудови математичної моделі процесів розвитку водоростей як складової частини фітопланктону у водоймищах потрібні такі показники, як кількісний склад фітопланктону та його біомаса. Визначення якісного та кількісного складу водоростей зазвичай проводиться шляхом гідробіологічного аналізу [3], [4], [6], [8]. Основний метод аналізу полягає у концентрації фітопланктону на мембранних фільтрах і подальшому підрахунку кількості водоростей у камері Нажотта або на предметному склі, які розташовані під мікроскопом.

Біомаса фітопланктону визначається розрахунково-об'ємним методом. Необхідною умовою для цього є наявність даних по чисельності різних видів водоростей у пробах та лінійні розміри клітин водоростей.

Для вимірювань розмірів водоростей їх прирівнюють до певних, найбільш подібних до даної морфологічної форми водоростей, геометричних тіл: кулі, паралелепіпеду, циліндру, конусу тощо. Далі проводять вимірювання необхідних геометричних характеристик водоростей: радіусу, діаметру, висоти, довжини тощо. Вимірювання розмірів водоростевих клітин виконується за допомогою окуляр-мікрометра з вимірювальною лінійкою, які входять до складу мікроскопа.

Для отримання більш точних даних необхідно провести вимірювання лінійних розмірів не менш як 30 водоростевих клітин одного виду. Отримані дані опрацьовуються статистично. Визначення об'єму клітин водоростей проводять за відомими геометричними формулами на основі отриманих лінійних розмірів конкретної водорості, подібної до певної геометричної фігури. Відносну густину екземплярів прісноводних водоростей (відносно води) приймають рівною 1,00–1,05. Вирахувану біомасу кожного виду множать на його чисельність і результат приводять у мг/дм^3 або у г/м^3 .

На основі результатів вимірювань визначаються інтегральні показники стану і розвитку водоростей як складової частини фітопланктону водоймищ. Найбільш інформативними і поширеними структурно-функціональними показниками стану фітопланктону є видове, таксономічне, екологічне, інформаційне та кількісне різноманіття, характеристика структури чисельності угруповань та біомаса [9], [10].

Основним недоліком наведених методів є їх велика трудомісткість. Подолання цього недоліку можливе шляхом застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень з урахуванням особливостей задачі, що вирішується, особливо з урахуванням необхідності моделювання процесів розвитку водоростей на основі отриманих показників.

Широке розповсюдження інформаційно-комп'ютерної техніки призвело до створення різноманітних апаратних засобів одержання цифрових відеозображень [11], [12]. Ці засоби цілком здатні забезпечити отримання відеозображень проб води, розмішених у мікроскопі. Основними з цих засобів є цифрові фотоапарати і цифрові відеокамери. Всі вони можуть бути використані для формування цифрових відеозображень проб води. Отримані таким чином відеозображення придатні до алгоритмічної обробки з метою визначення кількості й геометричних характеристик водоростей. Апаратні засоби та методи алгоритмічної обробки цифрових відеозображень забезпечують такі переваги:

- забезпечується автоматизація процесу досліджень;
- розширюється функціональні можливості та підвищується оперативність засобів вимірювань геометричних характеристик водоростей у пробах води.

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 декілька підходів до класифікації об'єктів за їх відеозображеннями [13], [14], [15]. Перш за все це – методи на основі геометричних ознак та структурно-синтаксичні методи. Методи на основі геометричних ознак базуються на визначенні деяких універсальних інваріант, тобто кількісних ознак, що є інваріантними до масштабування, зсуву та пороту об'єкта на різних відеозображеннях. Такі ознаки характеризують узагальнено форму об'єктів. Структурно-синтаксичні методи ґрунтуються на визначенні структурних відносин між фрагментами відеозображень об'єктів і використовують апарат дискретної математики.

Оскільки в даному випадку форма водоростей є відносно простою і окремі їх екземпляри розглядаються і класифікуються незалежно один від одного, то доцільно використовувати метод геометричних ознак. Тим більше, що геометричні ознаки також потрібні для розрахунку показників стану екосистеми водоймища (біомаса планктону тощо).

Для класифікації водоростей за видовим складом доцільно використовувати геометричні ознаки, інваріантні до зсуву і повороту об'єктів, що розпізнаються на відеозображенні. Найбільшою мірою належність об'єкта певному класу характеризують моменти інерції [13], [14]. Головні моменти інерції розраховуються за формулою:

$$J_{1,2} = \frac{1}{2}(J_x + J_y) \pm \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4}(J_x - J_y)^2}. \quad (1)$$

Моменти інерції J_x , J_y та J_{xy} розраховуються на основі значень функції яскравості $f(x, y)$ для множини Ω дискретних точок відеозображення, що належать об'єкту:

$$\begin{aligned} J_x &= \sum_{\Omega} (x - x_c)^2 f(x, y), \\ J_y &= \sum_{\Omega} (y - y_c)^2 f(x, y), \\ J_{xy} &= \sum_{\Omega} (x - x_c)(y - y_c) f(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

де x і y – координати дискретних точок об'єкта,

x_c і y_c – координати центра мас об'єкта.

Координати центра мас об'єкта дорівнюють:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} x f(x, y), \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} y f(x, y), \quad (3)$$

де N – кількість дискретних точок, що належать об'єкту.

Обчислення цих та інших геометричних ознак об'єктів доцільно виконувати за допомогою стандартних функцій цифрової обробки відеозображень, реалізованих в програмі Matlab та інструментальному пакеті Image Processing Toolbox [16].

Пропонується методика визначення показників розвитку водоростей на основі використання інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень проб води. Отримані таким чином результати є початковими даними для розробки математичних моделей процесів розвитку водоростей у водоймищах. Методика полягає у наступному: відбір і підготовка проб води з водоростями з контрольних точок водоймища; 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 і геометричних ознак водоростей; розрахунок інтегральних показників розвитку водоростей, побудова графіків і гістограм; прогноз процесів розвитку водоростей у водоймищі.

Обробка відеозображень включає перетворення початкового кольорового відеозображення у відеозображення в градаціях яскравості з врахуванням особливостей кольору водоростей і кольору фона; сегментацію за пороговим значенням яскравості; 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.

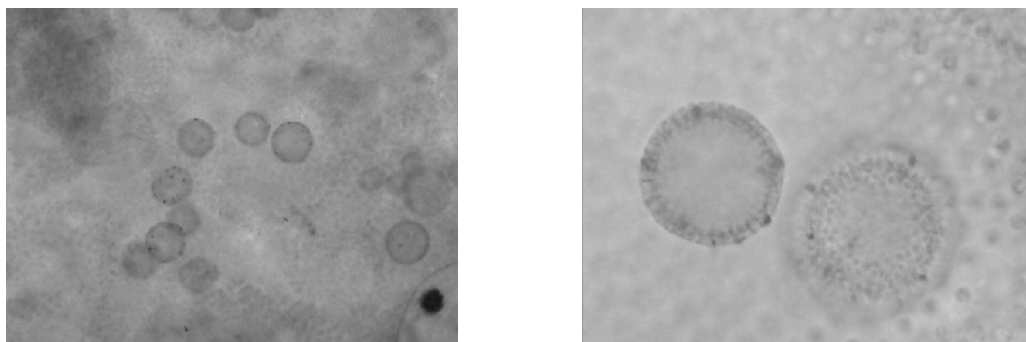
Розглянемо приклад дослідження водоростей на основі запропонованої методики.

Для досліджень використовувалися декілька зразків водоростей, розташованих на предметному склі мікроскопа. Відеозображення формувалися за допомогою лабораторного мікроскопа МС 200Т (виробництво Micros, Австрія) з вбудованою цифровою кольоровою відеокамерою САМ 2800. Основні технічні характеристики цього обладнання:

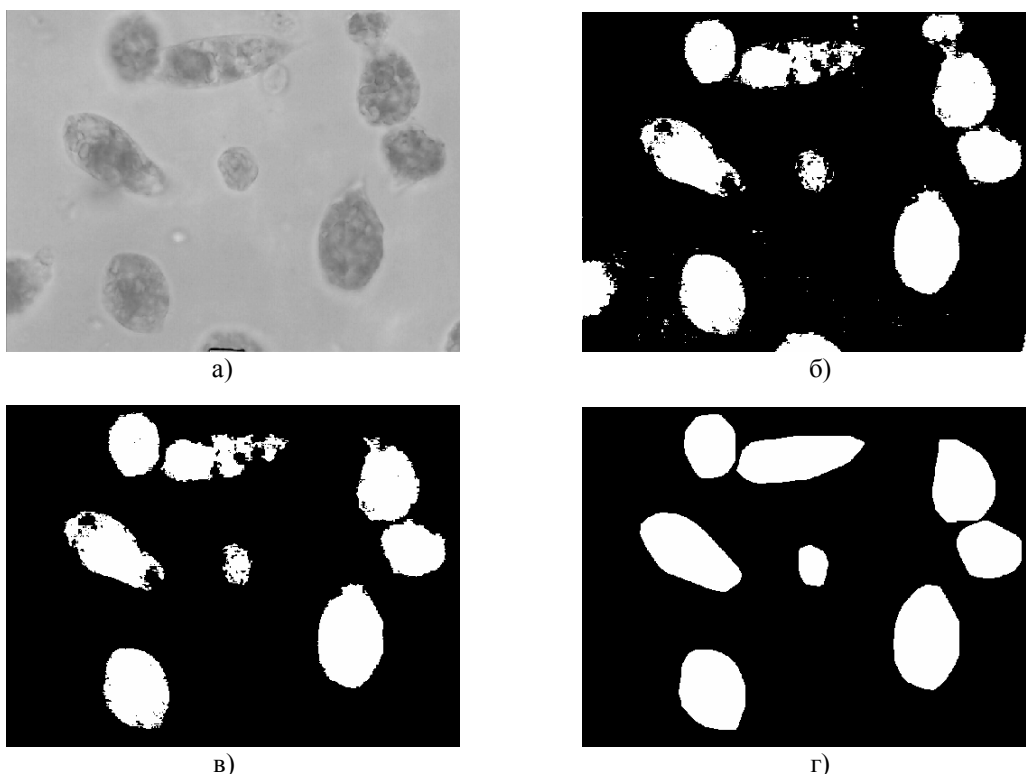
- збільшення мікроскопа: $40^x \dots 1000^x$;
- розмір зображення відеокамери: 640x480 дискретних точок;
- частота формування відеозображень: 12 кадрів за секунду;
- розрізняюча здатність: 360 телевізійних ліній по горизонталі;
- вихідний інтерфейс: USB.

У результаті були отримані відеозображення водоростей (рис. 1). Як бачимо, дане обладнання забезпечує достатнє збільшення і розрізняючу здатність для дослідження водоростей на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень.

На рис. 2 наведено результати цифрової обробки відеозображення водоростей відповідно до запропонованої методики.



а) б)
Рис. 1. Відеозображення водоростей *volvox globator*:
а) збільшення 100^x; б) збільшення 400^x



а) б) в) г)
Рис. 2. Цифрова обробка відеозображення водоростей *euglena proxima*:
а) початкове кольорове відеозображення (збільшення 400^x); б) результат сегментації на об'єкти і фон;
в) результат видалення завад та об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; г) результат заповнення порожнин в об'єктах

Після розподілу початкового відеозображення на об'єкти і фон за методом кольорової сегментації було виконано видалення шумів та об'єктів, що розташовані на межі відеозображення. Далі були заповнені порожнини в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення.

Результати вимірювань і розрахунків геометричних ознак для деяких з об'єктів наведено в таблиці 1. Координати і розміри об'єктів вимірювалися безпосередньо за відеозображенням морфометричні ознаки та коефіцієнти форми розраховувалися таким чином:

- центр мас: за формулою (3);
- еквівалентний діаметр: $d_e = \sqrt{4S / \pi}$, де S – площа об'єкта;
- моменти і осі інерції: на основі формул (1) та (2).
- коефіцієнт випуклості: $k_c = S / S_c$, де S_c – випукла площа об'єкта (площа випуклого багатокутника, в який вписано об'єкт);
- коефіцієнт заповнення: $k_f = S / (w \cdot h)$, де w і h – ширина і висота об'єкта;
- ексцентриситет визначався для еліпса, що має головні моменти інерції такі ж, як у об'єкта.

На основі даних таблиці 1 можна зробити висновок про те, що морфометричні ознаки і коефіцієнти форми можуть бути використані для визначення видового складу водоростей в пробах води. Вони подібні для трьох зразків водоростей *Euglena proxima* та відрізняються для зразка водоростей *Volvox globator*. Особливо це помітно для моментів та осей інерції і ексцентриситету.

Таблиця 1

Результати визначення геометричних ознак водоростей за їх відеозображенням

Геометричні ознаки	Водорості <i>euglena proxima</i>			Водорості <i>volvox globator</i>
	Об'єкт №1	Об'єкт №2	Об'єкт №3	Об'єкт №4
1. Координати і розміри (в дискретних точках відеозображення):				
1.1. Координати лівого верхнього кута прямокутника, що обмежує об'єкт	(82, 149)	(218, 41)	(438, 251)	(273, 176)
1.2. Ширина та висота	143, 111	179, 68	93, 148	268, 269
1.3. Площа	9428	8967	10604	54531
1.4. Випукла площа (площа випуклого багатокутника, в який вписано об'єкт)	9629	9139	10759	54956
2. Морфометричні ознаки: (в дискретних точках відеозображення)				
2.1. Центр мас	(150, 204)	(301, 72)	(484, 326)	(409, 313)
2.2. Еквівалентний діаметр	110	107	116	264
2.3. Довжина максимальної осі інерції	160	181	146	272
2.4. Довжина мінімальної осі інерції	76	64	93	256
3. Коефіцієнти форми:				
3.1. Коефіцієнт випуклості	0,979	0,981	0,986	0,992
3.2. Коефіцієнт заповнення	0,594	0,737	0,770	0,756
3.3. Ексцентриситет	0,879	0,936	0,769	0,338

Дані про кількість та видовий склад водоростей у пробах води, отримані на основі цифрової обробки відеозображень, є початковими даними для розрахунку інтегральних показників розвитку водоростей у водоймищах та для побудови математичної моделі цих процесів. Взагалі нам необхідно побудувати математичну модель, яка дозволила б прогнозувати розвиток водоростей та управляти даним процесом.

Побудова математичної моделі процесів розвитку водоростей у водосховищах та інших водоймищах складається з таких етапів:

– отримання і накопичення експериментальних даних про процеси розвитку водоростей протягом певного періоду;

– введення цих даних в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ;

– визначення загального вигляду функції, що описує даний процес;

– визначення чисельних значень коефіцієнтів функції;

– побудова графіків і визначення похибок моделювання.

Розглянемо приклад моделювання процесів розвитку синьо-зелених водоростей у водосховищі “Дениші” (рис. 3). Один з можливих варіантів побудови математичної моделі полягає у визначенні коефіцієнтів поліному, що апроксимує експериментальні дані.

Результати показують, що поліном 6-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку синьо-зелених водоростей протягом року.

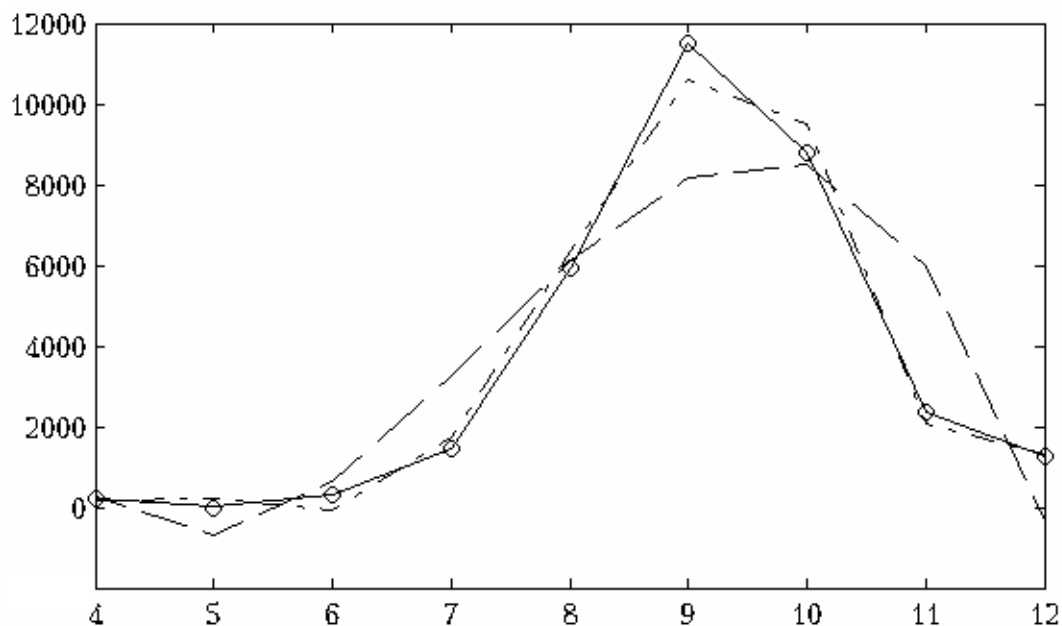


Рис. 3. Моделювання процесів розвитку синьо-зелених водоростей у водосховищі "Дениши" (по горизонтальній осі – порядковий номер місяця, по вертикальній – концентрація водоростей, кількість на см^3 , окремі точки – дані експериментальних досліджень, штрихова лінія – апроксимація експериментальних даних поліномом 3-го ступеня, штрихпунктирна лінія – апроксимація поліномом 6-го ступеня, суцільна лінія – апроксимація поліномом 8-го ступеня)

Висновки

Розглянуто можливості застосування цифрової обробки відеозображень для визначення і моделювання показників розвитку водоростей у водоймищах господарсько-побутового призначення. Цифрова обробка відеозображень проб води дозволяє визначати кількість і вимірювати геометричні характеристики водоростей. На основі цих результатів можна проводити ідентифікацію водоростей за видовим складом та визначити показники, що характеризують стан екосистеми водоймища.

Результати прогнозу розвитку водоростей у водосховищах на основі математичних моделей мають практичне значення та практичне застосування. Вони можуть бути використані співробітниками водоканалу при проведенні деєвтрофікаційних заходів у водосховищах та інших водоймищах господарсько-побутового призначення, а також при детоксикації води.

Подальшим напрямком досліджень повинно бути виявлення криволінійної кореляційної залежності між концентрацією водоростей (кількісним складом) та показниками (факторами) впливу на них. Також для підвищення якості моделювання та прогнозування планується використання нових методів математичного моделювання на основі нейронних мереж.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии: Учебник для вузов. – К.: Генеза, 2004. – 664 с.
2. Ганьшина Л.А. Методы изучения фитопланктона // Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л.: Гидрометеоздат. – 1983. – С. 79–86.
3. Василевич В.И. Статистические методы в геоботанике. – Л.: Наука, 1969. – 144 с.
4. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. – Л.: Наука, 1969. – 657 с.
5. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – 560 с.
6. Топачевский А.В., Масюк Н.П. Пресноводные водоросли Украинской ССР. – К.: Выща школа, 1984. – 333 с.
7. Матеріали Internet-сайтів www.micros.at, www.micros-at.ru.
8. Васер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. Водоросли: Справочник. – К.: Наукова думка, 1989. – 608 с.

9. Андреев А.Д., Щербак В.И. Интегральная количественная оценка состояния фитопланктонного сообщества по структурным показателям // Гидробиологический журнал. – 1994. – Т. 30. – № 2. – С. 3–7.
10. Кузьмин Г.В. Фитопланктон // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – С. 73–78.
11. Шарыгин М.Е. Сканеры и цифровые камеры. – СПб.: ВНУ – Санкт-Петербург, 2000. – 384 с.
12. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
13. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 792 с.
14. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.
15. Янин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. – М.: Машиностроение, 1995. – 112 с.
16. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Matlab. Обработка сигналов и изображений: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002.

АРИСТАРХОВА Елла Олександрівна – кандидат біологічних наук, доцент кафедри природничих наук Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гідробіологія;
- математичне моделювання.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович — кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання геометричних величин;
- цифрова обробка відеозображень.

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

Наукові інтереси:

- гідробіологія;
- математичне моделювання.

Подано 04.04.2005

Аристархова Е.О., Подчашинський Ю.О., Шавурська Т.О. Визначення та математичне моделювання показників розвитку водоростей у водосховищах на основі цифрової обробки відеозображень

Аристархова Э.А., Подчашинский Ю.А., Шавурская Т.А. Определение и математическое моделирование показателей развития водорослей в водохранилищах на основе цифровой обработки видеоизображений

Aristarkhova E.A., Podchashinsky Yu.A., Shavurska T.A. The definition and mathematical modelling of indexes development of seaweed in reservoirs based on digital images processing

УДК 004.932:574.5

Визначення та математичне моделювання показників розвитку водоростей у водосховищах на основі цифрової обробки відеозображень / Е.О. Аристархова, Ю.О. Подчашинський, Т.О. Шавурська

Розглянуто можливості застосування цифрової обробки відеозображень для визначення і моделювання показників розвитку водоростей у водосховищах господарсько-побутового призначення. Цифрова обробка відеозображень планктонних водоростей, відібраних з вододжерел, дозволяє визначити їх кількість і вимірювати геометричні характеристики. На основі цих результатів можна удосконалити проведення ідентифікації водоростей за видовим складом та визначити показники, що характеризують стан водних екосистем.

УДК 004.932:574.5

Определение и математическое моделирование показателей развития водорослей в водохранилищах на основе цифровой обработки видеоизображений / Э.А. Аристархова, Ю.А. Подчашинский, Т.А. Шавурская

Рассмотрены возможности применения цифровой обработки видеоизображений для определения и моделирования показателей развития водорослей в водохранилищах хозяйственно-бытового назначения. Цифровая обработка видеоизображений проб воды позволяет определять количество и измерять геометрические характеристики водорослей. На основе этих результатов можно усовершенствовать проведение идентификации водорослей по видовому составу и определить показатели, характеризующие состояние водных экосистем.

УДК 004.932:574.5

The definition and mathematical modelling of indexes development of seaweed in reservoirs based on digital images processing / E.A. Aristarkhova, Yu.A. Podchashinsky, T.A. Shavurska

The possibilities of application of digital images processing for the definition and modelling of indexes development of seaweed in reservoirs are considered. The digital images processing of tests of water allows to define of amount and to measure geometric performances of seaweed. Because these outcomes it is possible to execute a classification of seaweed and to define indexes describing a condition of ecological system of a reservoir.