

Т.О. Єльнікова, к.т.н., доц.

І.Г. Коцюба, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОЗВИТКУ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДОЙМАХ

Методики контролю процесів евтрофікації у водоймах засновані на відборі проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистеми водойми. Однак ці методики мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з використанням ручної праці. Розроблено метод визначення геометричних параметрів фітопланктону на основі використання нейронних мереж для обробки проб води. Даний метод включає відбір проб води з водойм, розміщення їх у мікроскопі з цифровою відеокамерою, формування та комп'ютерної обробки відеозображень. За допомогою даного методу досліджено евтрофні процеси водосховищ річки Тетерів та дано порівняльний аналіз евтрофних процесів водосховища «Дениші» та водозабору «Відсічне» протягом 2014–2015 років. Виявлено відмінності якісного та кількісного складу фітопланктонних водоростей в обох водосховищах річки Тетерів, що використовуються для водопостачання м. Житомира. Досліджено вплив екзо- та ендегенних факторів на процеси розвитку фітопланктону. Результати досліджень можуть бути використані для контролю та прогнозування екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення, що використовуються для водопостачання населених пунктів.

Ключові слова: фітопланктон; евтрофні процеси; відеозображення; геометричні параметри; вимірювання; поліноміальна модель.

Постановка проблеми. Проблема забруднення джерел питної води залишається досить актуальною, важливою та суттєвою на сьогодні. Існуючі джерела водопостачання Житомирської області зазнають негативних змін та стають непридатними у використанні для господарських потреб. Фітопланктонні організми швидко реагують на найменші зміни водного середовища і таким чином здатні вчасно повідомляти про характер та ступінь забрудненості водного середовища. Будучи продуцентами органічної речовини, водорості виділяють кисень при фотосинтезі, а за надлишкового свого розвитку призводять до «цвітіння води» та погіршення її якості. Таким чином, рівень забруднення будь-якої водної екосистеми та інші складові екологічного моніторингу можуть бути надійно охарактеризовані шляхом дослідження і контролю видового складу, чисельності та біомаси планктонних водоростей. Тому нами було обрано фітопланктон як індикатор якості води.

Для контролю та прогнозування процесів розвитку фітопланктонних форм необхідно визначати кількість екземплярів та біомасу фітопланктону у 1 дм³ води та ідентифікувати їх за видовим складом. Це може бути здійснено шляхом відбору проб води з водойм, розміщення цих проб у мікроскопі з цифровою відеокамерою, формування та комп'ютерної обробки відеозображень фітопланктону. Для ідентифікації та визначення біомаси пропонується вимірювати геометричні параметри, що характеризують розмір та форму кожного екземпляру фітопланктону.

Тому розробка засобів вимірювання геометричних параметрів фітопланктону та моделювання процесів його розвитку є актуальною науково-технічною задачею.

Мета статті. Дослідити процеси евтрофікації водосховищ річки Тетерів Житомирської області на основі використання цифрових відеозображень проб води та здійснити порівняльний аналіз евтрофних процесів водосховища «Дениші» та водозабору «Відсічне» протягом 2014–2015 років на основі інформаційно-комп'ютерних технологій.

Постановка завдання. Провести ідентифікацію фітопланктону на основі використання цифрових відеозображень проб води та штучної нейронної мережі та розробити математичну модель сезонної динаміки розвитку фітопланктонних водоростей у водосховищах річки Тетерів Житомирської області протягом 2014–2015 років.

Аналіз останніх досліджень. Питанням вимірювання геометричних параметрів об'єктів на відеозображеннях присвячені роботи ряду відомих українських та зарубіжних вчених [1–7]. Однак у цих роботах відсутні відомості про вимірювання геометричних параметрів

фітопланктону на основі алгоритмічної обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці параметри. Також основною перешкодою для оперативного здійснення контролю за станом водойм є застарілі відомі методи вимірювання геометричних параметрів фітопланктону, розрахунку його чисельності та маси [7, 8].

Останнім часом з'явилося ряд науково-технічних розробок по дослідженню мікроорганізмів у пробах води [9–14].

У патентах JP 5146791 та JP 6028453 [9, 10] формується відеозображення екземплярів мікроорганізмів, виконується їх класифікація за лінійним розміром (довжиною). Але такий принцип класифікації не може бути використаний для ідентифікації фітопланктону за видовим складом, оскільки два екземпляри фітопланктону можуть мати однаковий лінійний розмір, але різну форму та належати до різних видів. У патенті JP 6034556 [11] формується відеозображення мікроорганізмів, на цьому відеозображенні виділяються окремі екземпляри мікроорганізмів, підраховується їх кількість, але відсутні процедури вимірювань геометричних параметрів, розпізнавання й ідентифікації. У патенті JP 5192678 [12] на основі цифрової обробки відеозображень визначається кількість мікроорганізмів у потоці стічних промислових вод. У цьому патенті відсутнє визначення ознак мікроорганізмів, необхідне для їх ідентифікації за видовим складом.

У науковій статті [13] розглянуто процедуру формування та обробки відеозображень фітопланктону, а також процедуру його ідентифікації. Ідентифікація виконується на основі обчислення спектра відеозображення та застосування кореляційного аналізу для порівняння спектрів відеозображень різних екземплярів фітопланктону. Однак такі спектральні ознаки дозволяють лише порівнювати відеозображення окремих екземплярів фітопланктону. Але вони не пов'язані безпосередньо з геометричними параметрами і класифікаційними ознаками форми для видів фітопланктону.

У науковій статті [14] розглянуто технічні засоби і спосіб ідентифікації 3-х видів морського фітопланктону за ознаками їх розмірів та форми. У статті також зазначається, що для ідентифікації в реальних умовах та для ідентифікації інших видів фітопланктону (наприклад, для фітопланктону прісноводних водойм) потрібні модифікація та доопрацювання цього способу. Таким чином, наведений у статті спосіб ідентифікації не може бути безпосередньо застосований для ідентифікації фітопланктону у водних об'єктах, що містять декілька десятків видів фітопланктону та використовуються для централізованого водопостачання населених пунктів.

Висока працездатність, низька ефективність та швидкодія вказаних методів вимірювань не дозволяють швидко виявляти зміни, що відбуваються у розвитку ГПФ, своєчасно реагувати на них, та розробляти математичні моделі цих процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Розрахунки геометричних параметрів фітопланктону та його біомаси виконано з використанням певних технічних засобів, що виконують формування та обробку цифрових відеозображень з метою визначення вказаних механічних величин (рис. 1). Було використано існуючі стандартні технічні засоби, а необхідні точність, швидкодію та функціональні можливості комп'ютеризованої системи забезпечено за допомогою алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації.

Процес вимірювання геометричних параметрів фітопланктону та його біомаси забезпечувався роботою технічних засобів (мікроскоп, пристрій формування цифрових відеозображень, цифрова ЕОМ та нейропроцесор) і програмного забезпечення, у якому реалізовано розроблені нові методи та алгоритми цифрової обробки відеозображень.

У комп'ютеризованій системі використано лабораторний мікроскоп МС 200Т (виробництво Micros, Австрія) з цифровою кольоровою відеокамерою САМ 2800 (рис. 2). Характеристики сформованих відеозображень: збільшення мікроскопу 400^x; розмір відеозображення 640x480 дискретних точок (д.т.); формується 15 відеозображень за секунду. Дане обладнання забезпечує збільшення і розподільчу здатність відеозображень, що достатні для досліджень фітопланктону.

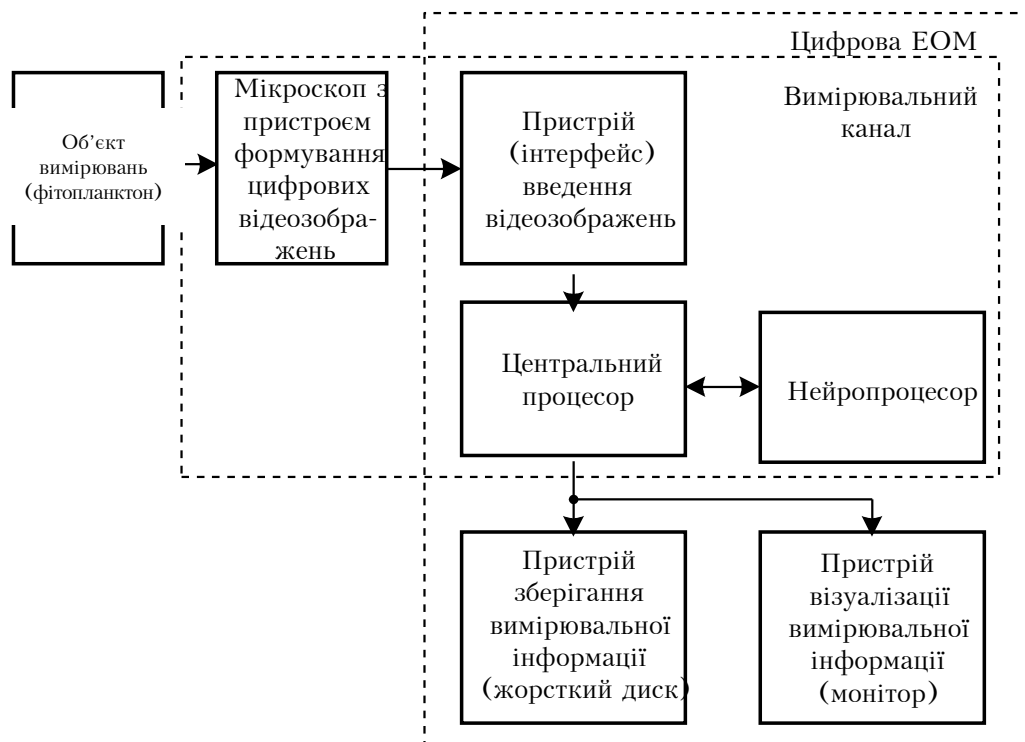


Рис. 1. Структурна схема комп'ютеризованої системи для вимірювання геометричних параметрів фітопланктону

Серед технічних характеристик мікроскопу та відеокамери найважливішою є розподільча здатність та точність вимірювань геометричних параметрів фітопланктону. У даному випадку розподільча здатність складається з оптичної розподільчої здатності оптичної системи мікроскопу та розподільчої здатності відеокамери, що обмежується кількістю дискретних точок в ПЗС-матриці.

Відомо, що розподільча здатність оптичної системи мікроскопа при спостереженні реальних об'єктів дорівнює:

$$\delta_{oc} = \frac{\lambda}{2A},$$

де λ – довжина хвилі світла; A – чисельна апертура об'єктива мікроскопа.

Чисельна апертура дає уяву про максимальне ефективне збільшення при добутку на 1000, тобто про таке збільшення, при якому два суміжні об'єкти вимірювань ще відрізняються як окремі.

У мікроскопі Micros 200 T для видимого світла ($\lambda = 0,53$ мкм) та збільшення $400\times$ маємо:

$$\delta_{oc} = \frac{0,53}{2 \cdot 0,65} = 0,41 \text{ мкм.}$$

Визначимо розподільчу здатність відеокамери. При збільшенні $400\times$ поле зору відеокамери по горизонталі складає 250 мкм, а розмір перетворювача «світло-сигнал» дорівнює 640 дискретних точок. Тому розподільча здатність відеокамери $\delta_{ек} = 250\text{мкм} / 640 = 0,39$ мкм.

Таким чином, характеристики оптичної системи та цифрової камери в мікроскопі є узгодженими між собою ($\delta_{ек} \approx \delta_{oc}$). Значення розподільчої здатності оптичної системи визначає мінімальну відстань між двома точками об'єктів вимірювань, для яких можуть бути зафіксовані різні значення координат у процесі вимірювань геометричних параметрів. Значення розподільчої здатності відеокамери визначає мінімальну похибку дискретності при вимірюванні розмірів екземплярів фітопланктону.

Згідно з розрахунком, максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктону складає близько ± 2 д.т. Під час використання мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою CAM-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує похибку вимірювання

лінійних розмірів фітопланктону, що не перевищує ± 1 мкм. Такі похибки є цілком прийнятними для задачі визначення кількості, біомаси та ідентифікації екземплярів фітопланктону.

Розроблену комп'ютеризовану систему використано для вимірювання геометричних параметрів, визначення кількості та біомаси, ідентифікації за видовим складом фітопланктону у водосховищах р. Тетерів, що використовуються для водопостачання м. Житомир. Проведено порівняльний аналіз евтрофних процесів водосховища «Дениші» та водозабору «Відсічне» протягом 2014–2015 років на основі інформаційно-комп'ютерних технологій.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що фітопланктон представлений діатомовими, зеленими, синьозеленими (ціанеї), евгленофітовими, золотистими та динофітовими водоростями. В обох водоймах загалом за три роки переважали: синьозелені (93,6 %) , зелені (2,8 %) та діатомові (3,4 %) водорості. Евгленофітові, золотисті та динофітові зустрічалися у невеликих кількостях, тому вирішального значення щодо впливу на показники, які характеризують токсичність водного середовища, вони не мали.

Проведеними дослідженнями розвитку фітопланктону вказано на циклічність у змінах геометричних параметрів, кількості та біомаси фітопланктону у водосховищах р. Тетерів, яка є характерною для водойм з обмеженим водообміном. Домінують протягом усього вегетативного періоду діатомові водорості, у другій половині літа вони поступово замінюються синьозеленими водоростями (рис. 2).

Протягом даних років прослідковувалися характерні відмінності у інтенсивності розмноження окремих фітопланктонних форм. Для усіх відділів водоростей шляхом ідентифікації на основі штучних нейронних мереж були виявлені періоди їх інтенсивного розмноження. Так, масове розмноження синьозелених водоростей припадало на кінець червня по листопад, приймаючи максимальне значення у серпні ($113503,3$ кл./см³) для водосховища «Дениші» та у вересні для водозабору «Відсічне».

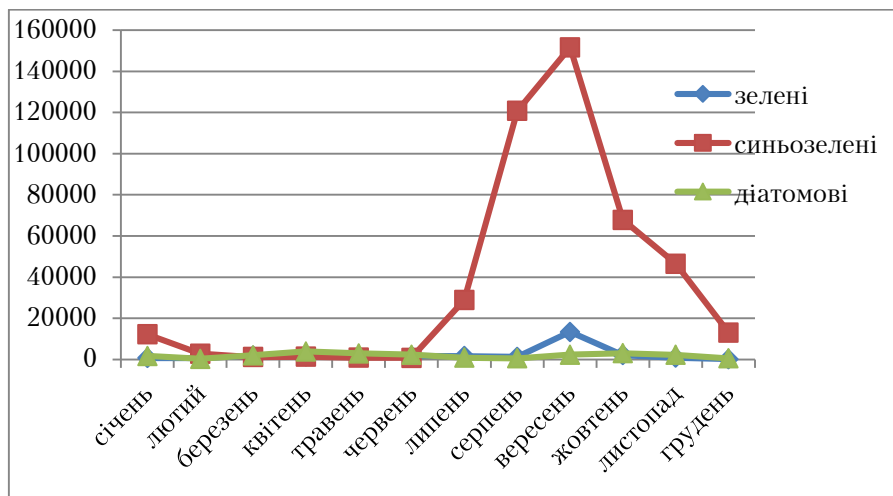


Рис. 2. Динаміка розвитку основних відділів водоростей (середні значення для водозабору «Відсічне» та водосховища «Дениші»)

Синьозелені водорості не відіграють великої ролі у весняному цвітінні води (квітень-травень), основна їх маса з'явилася лише у другій половині літа і зникла з настанням більш прохолодної погоди у грудні. Загалом переважали такі види: *Phormidium*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Cylindrospermum*.

Зелені водорості почали заселення водосховища «Дениші» у кінці травня, масового розмноження набули у червні (1883 кл./см³). У грудні спостерігається їх значне зменшення. У «Відсічному» зелені водорості почали заселення у середині червня та зникли з настанням більш прохолодної погоди (у кінці листопада). В обох водосховищах переважали види *Scenedesmus* та *Gibonema*. Діатомові зустрічалися у водосховищі в усі пори року і мали два періоди масового розмноження. Перший період – з квітня до червня (4770 кл./см³), а другий – з вересня до листопада (3941 кл./см³) (*Stephanodiscus*; *Melosira*; *Nitzschia*, *Fragilaria*).

З метою спостереження за основними циклами розвитку фітопланктону у роботі також побудовано статистичну математичну модель, що полягала у визначенні коефіцієнтів поліному, що апроксимує експериментальні дані. Результати показали, що поліном 5-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку синьозелених водоростей протягом року. Величина достовірності апроксимації сягає 0,9. Динаміку діатомових водоростей описує поліном 6-го ступеня. Його достовірність становить 0,8. Для зелених водоростей був використаний також поліном 6-го ступеня, але вже з меншою величиною достовірності 0,71.

Розглянемо приклад статистичного моделювання процесів розвитку синьозелених водоростей у водосховищі «Дениші» та водозабір «Відсічне» на р. Тетерів по середнім значенням, отриманим за два роки для цих двох водосховищ.

Перший метод моделювання полягав у тому, що побудовано статистичні математичні моделі. Визначено коефіцієнти поліному, що апроксимує експериментальні дані:

$$m_f = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i N_m^i,$$

де m_f – маса або кількість фітопланктону, b_i – коефіцієнти поліному, k – ступінь поліному, N_i – номер місяця.

Таким чином, маємо модель динаміки розвитку синьозелених водоростей протягом року:

$$m_{сз} = 31509 + 19940N_1 - 22281N_2 + 3393N_3 + 175N_4 - 6679N_5 + 3,1N_6$$

На рисунку 3 показано апроксимацію значень маси на прикладі розвитку синьозелених водоростей.

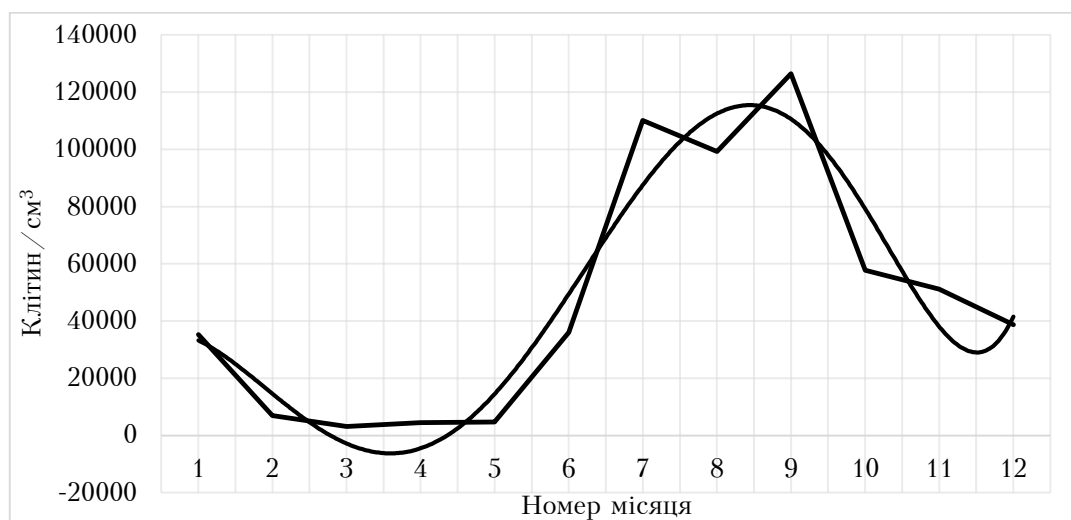


Рис. 3. Результати досліджень змін маси фітопланктону (на прикладі синьозелених водоростей): m_f – біомаса водоростей; N_i – порядковий номер місяця; водосховище «Дениші» – суцільна лінія, водозабір «Відсічне» – штрихова лінія, середнє значення для двох водосховищ – крапки

Висновки. Створено комп'ютеризовану систему для вимірювання геометричних параметрів, біомаси та ідентифікації фітопланктону. Ця система має розширені функціональні можливості та підвищену точність й швидкість порівняно з існуючими засобами вимірювань. Для вимірювань використовуються відеозображення проб води, що отримані з водойм та розміщені у мікроскопі з цифровою відеокамерою.

Похибка вимірювань лінійних розмірів для екземплярів фітопланктону не перевищує $\pm 1,0$ мкм (при збільшенні $400\times$ та розмірі відеозображення 640×480 д.т.), час вимірювань геометричних параметрів у одній пробі – 5 секунд, що є достатнім для вирішення задач контролю за екологічним станом водойм. Розширено функціональні можливості аналізу, зберігання та відображення вимірювальної інформації про параметри фітопланктону.

Фітопланктон водосховища «Дениші» та водозабору «Відсічне» представлений діатомовими, зеленими, синьо-зеленими, евгленофітовими, золотистими та динофітовими водоростями. В обох

водоймах загалом серед них переважали синьо-зелені (56%), діатомові (26 %) та зелені (16 %) водорості. Протягом року відбуваються певні зміни в інтенсивності розмноження окремих фітопланктонних форм, які характеризуються активним розвитком діатомових у весняні та осінні місяці (квітень–червень і жовтень–грудень), синьо-зелених – влітку та восени (кінець липня–початок листопада) і зелених – з квітня до початку грудня.

Отримані експериментальні дані за кількістю, біомасою та геометричними параметрами і виявленими їх особливості узагальнено у вигляді лінійних та нелінійних статистичних математичних моделях процесів зміни параметрів фітопланктону. Ці моделі можуть бути базою для прогнозування екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення та розробки практичних заходів із поліпшення водопостачання.

Список використаної літератури:

1. Измерительные сканирующие приборы / Под ред. *Б.С. Розова*. – М. : Машиностроение, 1980. – 198 с.
2. *Сарвин А.А.* Системы бесконтактных измерений геометрических параметров / *А.А. Сарвин*. – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1983. – 144 с.
3. *Растрюгин Л.А.* Системы оцувствления промышленных роботов в ГПС / *Л.А. Растрюгин*. – М. : Наука, 1989. – 286 с.
4. *Застрогин Ю.Ф.* Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера / *Ю.Ф. Застрогин*. – М. : Машиностроение, 1986. – 272 с.
5. *Поліщук Є.С.* Засоби та методи вимірювань неелектричних величин : підручник / *Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін.* ; за ред. проф. *Є.С. Поліщука*. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 618 с.
6. *Форсайт Д.* Компьютерное зрение. Современный подход / *Д.Форсайт, Д.Понс*. – М. : Техносфера, 2005. – 840 с.
7. *Андреев А.Д.* Интегральная количественная оценка состояния фитопланктонного сообщества по структурным показателям / *А.Д. Андреев, В.И. Щербак* // Гидробиологический журнал. – 1994. – Т. 30. – № 2. – С. 3–7.
8. Методичний посібник з визначення якості води / Під ред. *В.І. Назаренка*. – К., 2002. – 51 с.
9. Пат. 5146791 Японія, МПК С 02 F 3/00, G 01 N 21/84. Microbe Recognizer / Go Fumitomo, Yoda Mikio, Watanabe Shoji, Enbutsu Ichirou, Kaneko Tomonori, Hara Naoki ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19910336242 ; заявл. 26.11.91 ; опубл. 15.06.93.
10. Пат. 6028453 Японія, МПК С 02 F 3/00, G 01 N 15/06. Microorganism Recognizing and Monitoring Method by the Device / Takamatsu Shiego, Hara Naoki, Go Fumitomo, Watanabe Shoji, Yahagi Toshio, Yoda Mikio, Kaneko Tomonori ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19920179814 ; заявл. 07.07.92 ; опубл. 04.02.94.
11. Пат. 6034556 Японія, МПК С 02 F 3/00, G 01 N 15/00. Apparatus for Recognition and Display of Microbe / Go Fumitomo, Yoda Mikio, Hara Naoki, Enbutsu Ichirou, Watanabe Shoji ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19920190770 ; заявл. 17.07.92 ; опубл. 08.02.94.
12. Пат. 5192678 Японія, МПК С 02 F 3/12, G 01 N 33/18. Monitor of Microorganism Biota / Taguchi Kiyoshi ; заявник і власник патенту Tokyo Shibaura Electric Co. – № JP19920008659 ; заявл. 21.01.92 ; опубл. 03.08.93.
13. Automatic System for Phytoplanktonic Algae Identification / *J.L. Pech-Pacheco, G.Cristobal, J.Alvarez-Borrego, L.Cohen* // Limnetica, Asociacion Espaniola de Limnologia, Madrid, Spain. – 2001. – Vol. 20 (1). – P. 143–158.
14. *Gorskyl G.* The Autonomous Image Analyzer – Enumeration, Measurement and Identification of Marine Phytoplankton / *G.Gorskyl, P.Guilbert, E.Valenta* // Marine Ecology Progress Series. – 1989. – Vol. 58. – P. 133–142.

References:

1. Rozov, B.S. (Ed.) (1980), *Izmeritel'nye skanirujushhie pribory*, Mashinostroenie, Moscow, 198 p.
2. Sarvin, A.A. (1983), *Sistemy beskontaktnyh izmerenij geometricheskikh parametrov*, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, Leningrad, 144 p.
3. Rastrigin, L.A. (1989), *Sistemy ochuvstolenija promyshlennyh robotov v GPS*, Nauka, Moscow, 286 p.
4. Zastrogin, Ju.F. (1986), *Precizionnye izmerenija parametrov dvizhenija s ispol'zovaniem lazera*, Mashinostroenie, Moscow, 272 p.
5. Polishhuk, Je.S., Dorozhovec', M.M. and Stadnyk, B.I. (2008), *Zasoby ta metody vymirjuvan' neelektrychnyh velychyn*, in Polishhuk, Je.S. (Ed.), Beskyd Bit, L'viv, 618 p.
6. Forsajt, D. and Pons, D. (2005), *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyj podhod*, Tehnosfera, Moscow, 840 p.
7. Andreev, A.D. and Shherbak, V.I. (1994), "Integral'naja kolichestvennaja ocenka sostojanija fitoplanktonnogo soobshhestva po strukturnym pokazateljam", *Gidrobiologicheskij zhurnal*, Vol. 30, No. 2, pp. 3–7.
8. Nazarenko, V.I. (Ed.) (2002), *Metodychnyj posibnyk z vyznachennja jakosti vody*, Kyiv, 51 p.
9. Fumitomo, G., Mikio, Y., Shoji, W., Ichirou, E., Tomonori, K. and Naoki, H., Hitachi, Ltd. (1993), *Microbe Recognizer*, Japan, Pat. 5146791.
10. Shiego, T., Naoki, H., Fumitomo, G., Shoji, W., Toshio, Y., Mikio, Y. and Tomonori, K., Hitachi, Ltd. (1994), *Microorganism Recognizing and Monitoring Method by the Device*, Japan, Pat. 6028453.
11. Fumitomo, G., Mikio, Y., Naoki, H., Ichirou, E. and Shoji, W., Hitachi, Ltd. (1994), *Apparatus for Recognition and Display of Microbe*, Japan, Pat. 6034556.
12. Kiyoshi, T., Tokyo Shibaura Electric Co. (1993), *Monitor of Microorganism Biota*, Japan, Pat. 5192678.
13. Pech-Pacheco, J.L., Cristobal, G., Alvarez-Borrego, J. and Cohen, L. (2001), "Automatic System for Phytoplanktonic Algae Identification", *Limnetica, Asociacion Espaniola de Limnologia*, Vol. 20 (1), pp. 143–158.
14. Gorskiy, G., Guilbert, P. and Valenta, E. (1989), "The Autonomous Image Analyzer – Enumeration, Measurement and Identification of Marine Phytoplankton", *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 58, pp. 133–142.

ЄЛЬНІКОВА Тетяна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- засоби вимірювання екологічних параметрів;
- математичне моделювання екологічних систем.

КОЦЮБА Ірина Григорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- екобезпека;
- екологістика;
- екоекспертиза.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2016.