

Т.О. Єльнікова, к.т.н., доц.
Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.
Житомирський державний технологічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЕВТРОФНИХ ПРОЦЕСІВ У ВОДОСХОВИЩАХ РІЧКИ ТЕТЕРІВ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ ПРОБ ВОДИ

Розроблено математичну модель сезонної динаміки розвитку фітопланктонних водоростей у водосховищах річки Тетерів Житомирської області протягом 2012–2014 років. Досліджено вплив екзо- та ендогенних факторів на процеси розвитку фітопланктону. Початковими даними для моделювання є результати вимірювань геометричних параметрів, кількості та біомаси екземплярів фітопланктону у пробах води з водосховищ. Ці вимірювання здійснюються розробленою автоматизованою системою на основі формування та алгоритмічної обробки відеозображень проб води, що відібрані з водойм та розміщені у мікроскопі з вбудованою цифровою відеокамерою. Також проведено ідентифікацію екземплярів фітопланктону за видовим складом в автоматизованій системі з використанням штучних нейронних мереж, в тому числі – нейронної мережі Кохонена. Результати досліджень можуть бути використані для контролю та прогнозування екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення, що використовуються для водопостачання населених пунктів.

Ключові слова: фітопланктон; поліноміальна математична модель; цифрове відеозображення; геометричні параметри; ідентифікація фітопланктону.

Постановка проблеми. Актуальним науково-технічним завданням є розробка методів і технічних засобів контролю за розвитком фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення. Такий контроль реалізується шляхом вимірювання кількості екземплярів, геометричних параметрів та маси фітопланктону у пробах води, що отримані з цих водойм. Результати вимірювань використовуються для оцінки стану водойми та розробки заходів щодо поліпшення якості питної води.

Чисельність фітопланктону є важливою характеристикою стану екосистем та якості води. При значному підвищенні його чисельності з'являється біологічне забруднення, в результаті якого значно погіршується якість води – зменшується прозорість, змінюється кольоровість, кислотність, у воді з'являються токсичні сполуки (продукти життєдіяльності водоростей та бактерій) та велика кількість органічних речовин, що слугують харчовими продуктами для бактерій, в тому числі і патогенних, вода набуває неприємного запаху. Використання таких вод для підготовки питної води можна розглядати як реальну загрозу здоров'ю населення. Тому важливо встановити контроль за циклами розвитку фітопланктону, особливо в водоймах господарсько-побутового призначення, і виділити фактори, що впливають на зміну їх чисельності. На сьогодні відомо багато варіантів досліджень, оцінки та вимірювань процесів розвитку фітопланктону, а також розроблено багато відповідних методик та засобів контролю за цими процесами.

Методики контролю за сезонним розвитком фітопланктону у водоймах ґрунтовані на відборі проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистеми водойми. Однак ці методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, ручний підрахунок кількості екземплярів фітопланктону, визначення їх розмірів, класифікацію та подальший розрахунок потрібних показників. Вказані методики мають ряд суттєвих недоліків, що пов'язані з використанням ручної праці. Тому виникла необхідність створити нову методику вимірювань, що використовує сучасні інформаційно-комп'ютерні технології для збору та обробки вимірювальної інформації й в якій відсутні вказані недоліки існуючих методик.

Мета статті. Дослідити евтрофні процеси у водосховищах річки Тетерів Житомирської області на основі використання цифрових відеозображень проб води та здійснити моделювання цих процесів 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 2012–2014 років, дослідити екзо- та ендогенні фактори впливу на них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною перешкодою для оперативного здійснення контролю за станом водойм є застарілі відомі методи вимірювання геометричних параметрів фітопланктону, розрахунку його чисельності та маси [1–4]. Висока трудомісткість, низька ефективність та швидкодія вказаних методів вимірювань не дозволяють швидко виявляти зміни, що відбуваються у розвитку фітопланктону, та своєчасно реагувати на них. Останнім часом з'явилася низка науково-технічних розробок з дослідження мікроорганізмів у пробах води [1–6].

У патентах JP 5146791 та JP 6028453 [1, 2] формується відеозображення екземплярів мікроорганізмів. Воно вводиться в обчислювальний пристрій, визначаються кількість та розміри 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 [3] формується відеозображення мікроорганізмів. На ньому виділяються окремі екземпляри мікроорганізмів, підраховується їх кількість, а відеозображення виводиться на монітор. У цьому патенті розроблено технічні засоби для вимірювань, розпізнавання і візуалізації мікроорганізмів, але відсутні самі процедури вимірювань, розпізнавання та ідентифікації. Також у цьому патенті відсутнє визначення геометричних параметрів, що характеризують форму екземплярів мікроорганізмів та необхідні для їх ідентифікації за видовим складом.

У патенті JP 5192678 [4] 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 [5] 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 [6] розглянуто технічні засоби і спосіб ідентифікації 3-х видів морського фітопланктону за ознаками їх розмірів та форми. В 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 в 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.

У всіх вказаних розробках також відсутнє використання сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій і методів обробки відеозображень, в тому числі штучних нейронних мереж. Це суттєво знижує точність і швидкодію вимірювань геометричних параметрів фітопланктону, особливо в умовах впливу нестаціонарних та несприятливих факторів на автоматизовану систему. Тому виникла нагальна потреба у вдосконаленні існуючих методів вимірювань та контролю за фітопланктоном. Одним із ефективних методів вимірювань механічних величин є алгоритмічна обробка сигналів, які містять інформацію про об'єкт вимірювань. Пропонується для визначення геометричних параметрів фітопланктону перетворювати візуальну інформацію про ці параметри у відеозображення і виконувати алгоритмічну обробку отриманих відеозображень. З цією метою розроблено автоматизовану систему для визначення геометричних параметрів фітопланктону та контролю за станом водойм господарсько-побутового призначення.

Викладення основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Розроблено метод вимірювань геометричних параметрів та ідентифікації фітопланктону у пробах води з водних об'єктів (патент України на винахід 88673 С2 [11]), що виконують у такій послідовності:

1. Відбирають з водних об'єктів проби води, що містять фітопланктон.
2. Підготовлюють препарат з кожної проби води на предметному склі та розміщують його під окуляром мікроскопа.
3. Формують відеозображення препарату з кожної проби води та вводять це відеозображення в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ.
4. Виявляють кожен екземпляр фітопланктону у препаратах з кожної проби води шляхом алгоритмічної обробки відеозображень цих препаратів.
5. Для кожного екземпляра фітопланктону вимірюють геометричні параметри, що інваріантні до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення, що характеризують форму екземплярів фітопланктону.
6. Виконують ідентифікацію кожного екземпляра фітопланктону за його належністю до одного з видів. Як простір ознак для ідентифікації використовують результати п. 5.
7. Визначають загальну кількість фітопланктону кожного виду у кожному препараті.
8. Розраховують кількісні показники, що характеризують розвиток фітопланктону в цілому та його окремих видів у водному об'єкті.

Для експериментальних досліджень розробленого методу були сформовані відеозображення фітопланктону за допомогою лабораторного мікроскопа МС 200Т (виробництво Micros, Австрія) з цифровою кольоровою відеокамерою САМ 2800 (рис. 1). Характеристики відеозображень: збільшення мікроскопу $\times 400$; розмір відеозображення 640×480 д. т.; формується 12 відеозображень на секунду.



Рис. 1. Автоматизована система для вимірювання геометричних параметрів, об'єму і маси фітопланктону у пробах води з водоїм

Похибка вимірювань лінійних розмірів для екземплярів фітопланктону у пробі води дорівнює $\pm 1,0$ мкм (при збільшенні мікроскопу $\times 400$ та розмірі відеозображення, отриманого від цифрової відеокамери, 640×480 д. т.), час вимірювань геометричних параметрів у одній пробі 5 секунд, на відміну від відомих засобів вимірювань з похибкою ± 20 мкм та часом вимірювань до 30 хвилин. Розширено функціональні можливості аналізу, зберігання та відображення вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону.

Проведено ідентифікацію фітопланктону на основі використання цифрових відеозображень проб води. У цьому методі після розміщення у мікроскопі препарату з проби води формують його відеозображення за допомогою відеокамери, що приєднана до оптичної системи мікроскопа. Далі вводять це відеозображення в обчислювальне середовище цифрової електронної обчислювальної машини, причому виявлення кожного екземпляра фітопланктону виконують шляхом цифрової обробки відеозображення препарату з проби води. Після цього для кожного екземпляра фітопланктону розраховують геометричні ознаки форми, що інваріантні до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення. Ідентифікацію фітопланктону виконують за допомогою штучної нейронної мережі, причому кількість входів цієї мережі відповідає кількості геометричних параметри фітопланктону, що використовують для ідентифікації, а кількість виходів цієї мережі відповідає кількості видів

фітопланктону, що обрані для досліджень та можуть існувати в умовах водойм, які досліджують. Для навчання штучної нейронної мережі використовували тестові відеозображення, що містять фітопланктон заздалегідь відомих видів. Як простір ознак для ідентифікації використовують геометричні параметри фітопланктону, що виміряні за його відеозображеннями.

У даному методі ідентифікацію фітопланктону виконують на основі формування цифрових відеозображень препаратів з проб води та цифрової обробки цих відеозображень з використанням математичного апарату та алгоритмів штучних нейронних мереж. Таким чином, підвищується достовірність ідентифікації фітопланктону [12–14].

На ріці Тетерев для водопостачання м. Житомира діють два створи:

1 – у районі с. Дениші, де функціонує водоймище;

2 – водосховище «Відсічне», звідки у даний час здійснюється забір води для господарсько-питного водопостачання.

Гідровузел у районі с. Дениші складається з:

– водозливної бетонної плити, призначеної для створення у руслі достатніх глибин при витратах стічного стоку;

водосховища, призначеного для сезонного регулювання стоку води.

Повний об'єм водоймища 12,925 млн. м³. Мертвий об'єм складає 2,0 млн. м³. Вода змінюється у водосховищі 12 разів на рік; площа дзеркала – 255,3 га; водозливна гребля збірної-монолітної конструкції – з залізобетонних блоків. Відмітка гребеня греблі – 205,2 м. Висота греблі – 22,0 м. Ширина греблі в основі – 21,8 м. Довжина греблі – 101,6 м.

Характеристика водосховища «Відсічне»:

площа водозабору – 1780 км²;

максимальні витрати весняної повені при тиску 1 % – 420 м³/с;

площа водного дзеркала при НПП – 320 га;

повний об'єм водосховища при НПП дорівнює 10,2 млн. м³;

корисний об'єм водосховища – 7,5 млн. м³;

максимальна глибина – 11 м;

середня глибина – 3,2 м.

Водозабір і станція першого підйому розташовані на березі водосховища «Відсічне» на відстані 7 км на південний захід від міста Житомир. У результаті проведених досліджень було встановлено, що фітопланктон Денишівського водосховища та водозабору «Відсічне» представлений діатомовими, зеленими, синьо-зеленими, евгленофітовими, золотистими та динофітовими водоростями. В обох водоймах в цілому за три роки переважали такі водорості: синьо-зелені (93,6 %), зелені (2,8 %) та діатомові (3,4 %). Евгленофітові, золотисті та динофітові водорості зустрічалися у невеликих кількостях і найбільше їх було виявлено у теплий період року, коли температура води в середньому піднімається вище 15 °С, а саме: евгленофітові – червень–жовтень, динофітові – червень–серпень, золотисті – серпень (водосховище «Дениші»), травень (водозабір «Відсічне»). Тому вирішального значення щодо впливу на показники, які характеризують токсичність водного середовища, вони не мали.

За відсотковим співвідношенням кількості синьо-зелених водоростей у водосховищі «Дениші» та водозабір «Відсічне» майже однакова. Зелені та діатомові різняться за кількістю у цих водних об'єктах. Діатомових більше у водосховищі «Дениші», а зелених – у водозабір «Відсічне». Протягом 2012–2014 років простежувалися характерні відмінності у інтенсивності розмноження окремих фітопланктонних форм.

Для попередження евтрофних процесів у водоймах виникає необхідність у здійсненні контролю за динамікою сполук нітрогену і фосфору та спостереження за основними циклами розвитку фітопланктону. За результатами досліджень було встановлено, що нітрати та фосфати не лише впливали на розвиток фітопланктону, але й були певним чином пов'язані між собою. Розрахунок коефіцієнтів кореляції ($R = 0,5800$) виявив досить тісний зв'язок між концентраціями нітритів та фосфатів у водосховищах протягом року. Пояснення цього явища ґрунтується на визначенні особливостей взаємодії між зазначеними сполуками. Як відомо, сумісна дія Нітрогену та Фосфору сильніше стимулює розвиток фітопланктону, ніж дія кожного з цих біогенних елементів окремо. Крім того, встановлено, що Фосфор відіграє регулюючу роль у формуванні продукуювання. Підвищення його вмісту у воді сприяє більш повному використанню водоростями Нітрогену. Фосфор можна вважати основним фактором

виникнення евтрофікації водойм. Без нього навіть при збагаченні водного середовища Нітрогеном евтрофні процеси значно послаблюються.

Побудова математичної моделі процесів розвитку водоростей у водосховищах річки Тетерів 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.

У роботі побудова статистичної математичної моделі полягає у визначенні коефіцієнтів поліному, що апроксимує експериментальні дані (рис. 2–4).

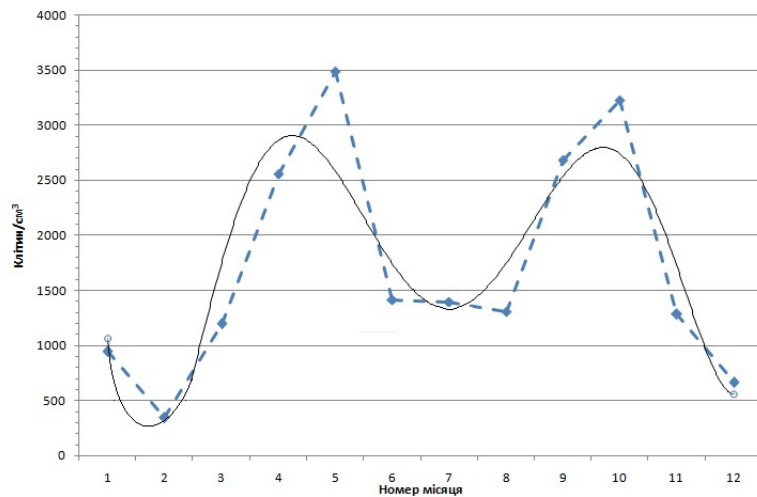


Рис. 2. Апроксимація процесів розвитку діатомових водоростей (середнє значення для двох водосховищ): штрихова лінія – дані експериментальних досліджень; суцільна лінія – апроксимація експериментальних даних поліномом 5-го ступеня

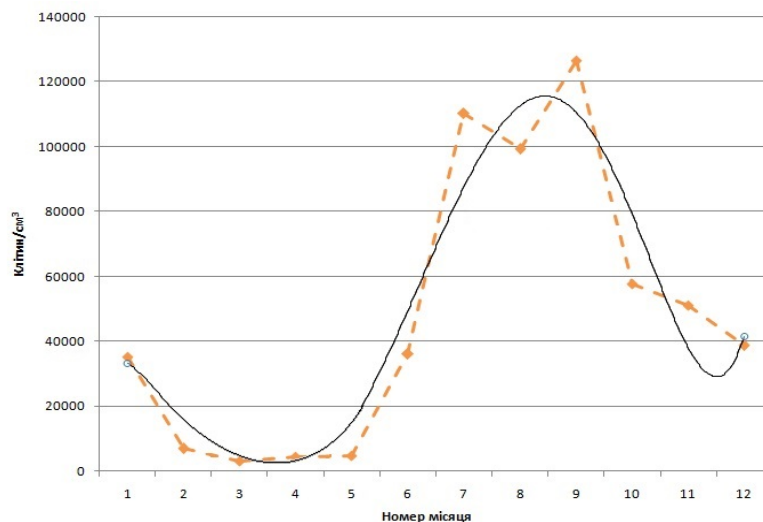


Рис. 3. Апроксимація процесів розвитку синьо-зелених водоростей (середнє значення для двох водосховищ): штрихова лінія – дані експериментальних досліджень; суцільна лінія – апроксимація експериментальних даних поліномом 5-го ступеня

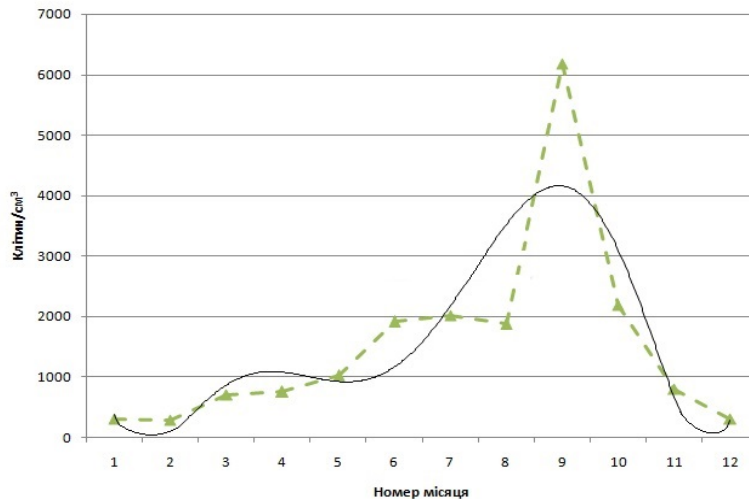


Рис. 4. Апроксимація процесів розвитку зелених водоростей (середнє значення для двох водосховищ): штрихова лінія – дані експериментальних досліджень; суцільна лінія – апроксимація експериментальних даних поліномом 6-го ступеня

Результати показують, що поліном 5-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку синьо-зелених водоростей протягом року, а поліном 6-го ступеня – динаміку розвитку діатомових та зелених водоростей.

Висновки. Проведено ідентифікацію фітопланктону на основі використання цифрових відеозображень проб води та штучної нейронної мережі та розроблено математичну модель сезонної динаміки розвитку фітопланктонних водоростей у водосховищах річки Тетерів Житомирської області протягом 2012–2014 років та дослідити екзо- та ендогенні фактори впливу на них. Використаний метод ідентифікації забезпечив підвищення достовірності та підвищення продуктивності ідентифікації фітопланктону у пробах води з водойм. Проведено кореляційний та факторний аналіз процесів евтрофікації водойм Житомирської області.

Список використаної літератури:

1. Математичне забезпечення інформаційно-керуючих систем / Б.В. Шамша, А.М. Гуржій та ін. – Харків : ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 448 с.
2. Щербак В.І. Методи досліджень фітопланктону / В.І. Щербак // Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем. – К., 2002. – С. 41–47.
3. Топачевский А.В. Пресноводные водоросли Украинской ССР / А.В. Топачевский, Н.П. Масюк. – К. : Высшая школа. Головное изд-во, 1984. – 336 с.
4. Щербак В.И. Интегральная количественная оценка состояния фитопланктонного сообщества по структурным показателям / А.Д. Андреев, В.И. Щербак // Гидробиологический журнал. – 1994. – Т. 30, № 2. – С. 3–7.
5. Пат. 5146791 Японія, МПК С 02 F 3/00, G 01 N 21/84. Microbe Recognizer / Go Fumitomo, Yoda Miki, Watanabe Shoji, Enbutsu Ichirou, Kaneko Tomonori, Hara Naoki ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19910336242 ; заявл. 26.11.91 ; опубл. 15.06.93.
6. 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 Miki, Kaneko Tomonori ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19920179814 ; заявл. 07.07.92 ; опубл. 04.02.94.
7. Пат. 6034556 Японія, МПК С 02 F 3/00, G 01 N 15/00. Apparatus for Recognition and Display of Microbe / Go Fumitomo, Yoda Miki, Hara Naoki, Enbutsu Ichirou, Watanabe Shoji ; заявник і власник патенту Hitachi, Ltd. – № JP19920190770 ; заявл. 17.07.92 ; опубл. 08.02.94.

8. 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.
9. 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). – Pp. 143–158.
10. *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. – Pp. 133–142.
11. Пат. 88673 С2 Україна, МПК (2009) С 02 F 3/00, С 02 F 3/12, С 12 Q 1/04, G 01 N 15/14. Спосіб ідентифікації фітопланктонних водоростей у пробах води з водних об'єктів / *Аристархова Е.О., Єльнікова Т.О., Подчашинський Ю.О.* ; заяв. і власник патенту ЖДТУ. – № а2007 09275 ; заявл. 14.08.07 ; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.
12. Нейронные сети: основные модели / Под ред *И.В. Заенцева.* – Воронеж, 1999. – 76 с.
13. *Круглов В.В.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / *В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов.* – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.
14. *Nelles O.* Neuronale Netze zur Identifikation nichtlinearer, dynamischer Systeme: Ein Uberblick / *O.Nelles, S.Ernst, R.Isermann* // *Automatisierungstechnik.* – 1997. – № 6. – Pp. 251–262.

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

Наукові інтереси:

- екологія та гідробіологія;
- засоби вимірювання екологічних параметрів;
- математичне моделювання екологічних систем.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка зображень;
- математичне моделювання складних систем.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2015.