



original article | UDC 556.531:556.114 | doi: 10.31210/visnyk2019.03.13

THE PROGNOSTICATION OF WATER RESERVOIR EUTROPHICATION PROCESSES ON THE EXAMPLE OF THE VORSKLA RIVER

P. V. Pysarenko,

ORCID ID: [0000-0002-4915-265X](https://orcid.org/0000-0002-4915-265X), E-mail: pysarenko@pdaa.edu.ua,

O. P. Korchagin,

Poltava State Agrarian Academy, 1/3, H. Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

The article deals with investigating the eutrophication process of natural water reservoirs. It has been mentioned that at present the development of theoretical foundations and search of practical measures in fighting mass development of cyanic bacteria in top layer water reservoirs are being actively conducted, which requires deep analysis and modeling eutrophication processes. Thus, the aim of the paper is studying the factors causing eutrophication of top layer water on the example of the Vorskla river and developing mathematical dependence models of the above mentioned factors and modeling the processes of water quality management based on the concept of nutrient limit. The research methods included conducting analytical, natural, laboratory studies, and also the calculation part. To investigate eutrophication process of water in the Vorskla river samples were taken 0.2–0.5 m deep from the water reservoir top layer (in different districts of the town of Poltava and its outskirts). Based on the obtained results it was established that the higher nitrogen and phosphorus content in the water was, the higher was the content of cyanic bacteria, which correspondingly increased the eutrophication process. To model the processes of eutrophication stationary one-dimensional model was developed, including the following variables: chlorophyll concentration (characterizing the concentration of phytoplankton), the concentrations of phosphorus orthophosphate, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and phosphorus, restored from bottom sediments. The modeling of biogenic substances' dynamics in the basin of the Vorskla river was conducted. It was found that the increasing of blue and green algae biomass caused a sharp decreasing of nitrogen concentration. This effect is explained by incoming of ammonium nitrogen with sewage water, processing ammonia to nitrates by bacteria, and also transferring impurities into the river basin. The results of mathematical water quality modeling showed that affecting the process of eutrophication limitation resulted in increasing the concentration of nutrients and decreasing phytoplankton concentration. The conducted modeling of the processes of water quality management (on the example of the Vorskla river) based on using target function enabled to determine the optimal content of biogenic substances, which can maintain the optimal chlorophyll content. Using the strategy, based on the concept of nutrients' limit enabled to define the optimal nitrate nitrogen content (2 mg/l and less), at which the growth of cyanic bacteria was not intensified. The obtained results enable to prognosticate mass appearing of cyanic bacteria in water reservoirs in summer and develop the measures of fighting this negative phenomenon.

Keywords: eutrophication of water reservoir, biogenic substances, cyanic bacteria, chlorophyll, modeling.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕВТРОФІКАЦІЇ ВОДОЙМ НА ПРИКЛАДІ РІЧКИ ВОРСКЛА

П. В. Писаренко, О. П. Корчагін,

Полтавська державна аграрна академія, вул. Г. Сковороди, 1/3, м. Полтава, 36003, Україна

У статті досліджено процес евтрофікації природніх водойм. Визначено, що нині у світі активно здійснюється розробка теоретичних основ і пошук практичних заходів з боротьби з масовим розви-

тком ціанобактерій у поверхневих водоймах, що потребує глибокого аналізу та моделювання процесів евтрофікації. Зважаючи на це, метою цієї роботи стало вивчення чинників, які спричиняють евтрофікацію поверхневих вод на прикладі річки Ворскла, розробка математичних моделей залежностей цих факторів та здійснення моделювання процесів управління якістю води на основі концепції ліміту поживних речовин. Методика дослідження включала проведення аналітичних, натурних та лабораторних досліджень, розрахункову частину. Для дослідження процесу евтрофікації води в річці Ворскла було взято проби на глибині 0,2–0,5 м від поверхні водойми (в різних районах м. Полтави та на околицях міста). На основі отриманих результатів встановлено, що чим вищий вміст у воді азоту й фосфору, тим більший вміст ціанобактерій, що, відповідно, посилює процес евтрофікації. Для моделювання процесів евтрофікації була розроблена стаціонарна одновимірна модель, що має такі змінні: концентрація хлорофілу (як характеристика концентрації фітопланктону), концентрація ортофосфату фосфору, амонійного азоту, нітратного азоту і відновленого з донних відкладень фосфору. Проведено моделювання динаміки біогенних речовин у басейні річки Ворскла. Встановлено, що збільшення біомаси синьо-зелених водоростей зумовлює різке зменшення концентрації азоту. Цей ефект пояснюється надходженням амонійного азоту зі стічними водами та переробкою бактеріями аміаку в нітрати, а також перенесенням забруднень у басейні річки. Результати математичного моделювання якості води свідчать, що вплив на процес лімітування евтрофікації призводить до збільшення концентрації поживних речовин і зниження концентрації фітопланктону. Проведене моделювання процесів управління якістю води (на прикладі річки Ворскла) на основі використання цільової функції дало змогу визначити оптимальний вміст біогенних речовин, що дозволяє тримати в оптимальному вмісті хлорофілу. Використання стратегії, основаної на концепції ліміту поживних речовин, дало змогу визначити оптимальний вміст нітратного азоту (2 мг/л і менше), за якого ріст ціанобактерій не інтенсифікується.

Отримані результати дозволяють прогнозувати масове виникнення ціанобактерій у водоймах влітку та розробити заходи боротьби з цим негативним явищем.

Ключові слова: евтрофікація водойми, біогенні речовини, ціанобактерії, хлорофіл, моделювання.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВТРОФИКАЦИИ ВОДОЕМОВ НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ВОРСКЛА

П. В. Писаренко, А. П. Корчагин,

Полтавская государственная аграрная академия, ул. Г. Сковороды, 1/3, г. Полтава, 36003, Украина

В статье проведено исследование процесса эвтрофикации естественных водоемов. Определено, что в настоящее время в мире активно осуществляется разработка теоретических основ и поиск практических мер по борьбе с массовым развитием цианобактерий в поверхностных водоемах, что требует глубокого анализа и моделирования процессов эвтрофикации. Исходя из этого, целью данной работы стало изучение факторов, которые вызывают эвтрофикацию поверхностных вод на примере реки Ворскла. Экспериментальным путем установлено, что увеличение биомассы сине-зеленых водорослей вызывает резкое уменьшение концентрации азота. Результаты математического моделирования качества воды показывают, что влияние на процесс лимитирования эвтрофикации приводит к увеличению концентрации питательных веществ и снижению концентрации фитопланктона. Использование стратегии, основанной на концепции лимита питательных веществ, позволила определить оптимальное содержание нитратного азота (2 мг/л и менее), при котором рост цианобактерий не интенсифицируется. Полученные результаты позволяют прогнозировать массовое возникновение цианобактерий в водоемах летом и разработать меры борьбы с этим негативным явлением.

Ключевые слова: эвтрофикация водоема, биогенные вещества, цианобактерии, хлорофилл, моделирование.

Вступ

Поверхневі водні об'єкти широко використовуються людством у різних галузях народного господарства, при цьому використання водних ресурсів супроводжується посиленням антропогенного тиску на водні екосистеми. Надходження органічних і токсичних сполук, біогенних елементів сприяє

виникненню умов для евтрофікації водойми, порушення процесу самоочищення, масового розвитку вищої водної рослинності.

Евтрофікація (від гр. *eutrophia* – добре харчування) – збільшення вмісту біогенних речовин у водоймі, що спричиняє бурхливе розмноження водоростей, зниження прозорості води й вмісту розчиненого кисню у глибинних шарах внаслідок розкладу органічної речовини мертвих рослин і тварин, а також масову загибель донних організмів [1]. Евтрофікація може бути наслідком природного старіння водойми, внесення добрив, забруднення стічними водами та ін. За рівнем евтрофікації водойми поділяються на оліготрофні (слабко евтрофіковані), мезотрофні (середньоевтрофіковані) та евтрофні (сильно евтрофіковані). Іноді також в окрему категорію виділяють гіперевтрофні (досить сильно евтрофіковані) водойми, в яких евтрофікація призводить до масового відмирання біоти й різкої зміни параметрів екосистеми [2].

Нині у світі активно здійснюється розробка теоретичних основ і пошук практичних заходів по боротьбі з масовим розвитком ціанобактерій у поверхневих водоймах, що потребує глибокого аналізу та моделювання процесів евтрофікації. З аналізу результатів попередніх досліджень (Ізраель Ю. [3], Ферейра Дж. [4], Яич К. [5], Клоерн Дж. [6], Сміс В. [7], Бакер Л. [8], Хорус І. [9], Лахті К. [10], Скулберг О. [11] Авраменко Н. [12]) випливає, що недоліком більшості виконаних експериментів із запобігання розвитку ціанобактерій у поверхневих водоймах є відсутність попередніх розрахунків та аналізу багаторічних результатів моніторингу гідробіологічних, гідрохімічних і гідрофізичних характеристик водойми. Рідко застосовується математичне моделювання, роль якого важлива для прогнозу результатів впливу на розвиток ціанобактерій у масштабі цілої водойми.

Отже, метою цієї роботи є вивчення чинників, які зумовлюють евтрофікацію поверхневих вод на прикладі річки Ворскла, розробка математичних моделей залежностей цих факторів та здійснення моделювання процесів управління якістю води на основі концепції ліміту поживних речовин. Отримані результати дадуть змогу прогнозувати масове виникнення ціанобактерій у водоймах влітку та розробити заходи боротьби з цим негативним явищем.

Зважаючи на вищевикладене, головними завданнями наших досліджень було: встановити вплив біогенних речовин на евтрофікацію водойм у динаміці; провести математичне моделювання факторів, які спричиняють евтрофікацію; розробити модель процесів управління якістю води на основі концепції ліміту поживних речовин та на основі використання цільової функції.

Матеріали і методи досліджень

Методики дослідження передбачали проведення аналітичних, натурних та лабораторних досліджень, розрахункову частину, математичну та графічну обробку отриманих результатів.

Дослідження проводили в різних районах річки Ворскли впродовж весняно-літнього періоду 2017–2019 років. Визначення вмісту речовин у воді проводили згідно зі стандартними методиками. Принцип методу визначення нітратів оснований на реакції між фенолдисульфоюкислотою [13]. Методика визначення вмісту хлоридів ґрунтується на титрометричному їх осадженні в нейтральному середовищі нітратом срібла за наявності хромату калію як індикатора [14]. Визначення сульфатів базується на осадженні їх у кислому середовищі хлоридом барію [15]. Сухий залишок визначали за методикою [16]. Вміст поліфосфатів, фенолів та нафтопродуктів у воді визначали за відповідними методиками [17–19]. Визначення вмісту у воді азоту та фосфору проводилося за допомогою гетерополікомплексів з використанням екстракційного та сорбційного розділення [20].

Інформація щодо концентрації хлорофілу і її мінливості у водному об'єкті служить критерієм при оцінці запасів біомаси фітопланктону і його продукції, а також індикатором забруднення вод. В основі методу, що застосовувався [21] – спектрофотометрування екстракту пігментів до і після його підкислення розчином соляної кислоти. Розрахунки концентрації хлорофілу a засновані на відомих питомих спектральних показниках поглинання світла хлорофілома a і основними компонентами, що заважають аналізу.

Для приготування екстракту пробу води фільтрують через мембранний фільтр з нанесеним на ньому шаром вуглекислого барію або магнію, осад роздрібнюють, пігменти екстрагують водним ацетоном з гомогенату і видаляють центрифугуванням з екстракту світловідображаючу суспензію.

При дослідженнях проби відбиралися з чотирьох ділянок на річці Ворскла: с. Петрівка, Полтавського р-ну; м. Полтава, вул. Сакко; м. Полтава, вул. Б. Хмельницького; Передмістя Полтави (8-й кілометр у Харківському напрямку).

Результати досліджень та їх обговорення

Для дослідження процесу евтрофікації води в річці Ворскла було взято проби на глибині 0,2–0,5 м від поверхні водойми (в різних районах м. Полтави та на околицях міста). Проби води бралися між 12:00 та 17:00 годинами.

Як показують результати проведених досліджень, на різних ділянках річки Ворскли, існує пряма залежність між вмістом у воді азоту та фосфору й розвитком водоростей. Чим вищий вміст у воді азоту й фосфору, тим більший вміст ціанобактерій, що, відповідно, посилює процес евтрофікації. Результати досліджень свідчать, що концентрація біогенних елементів і їхній режим залежать від інтенсивності біологічних і біохімічних процесів у водоймі та від кількості біогенів, що потрапляють у водойму зі стічними водами й поверхневим стоком на площі водозбору (рис. 1–2). Вважається, що надмірна евтрофікація водойм починається при вмісті у воді азоту в концентрації 0,2–0,3 мг/л, а фосфору – 0,01–0,02 мг/л [22].



Рис. 1. Вміст речовин на різних ділянках річки Ворскли

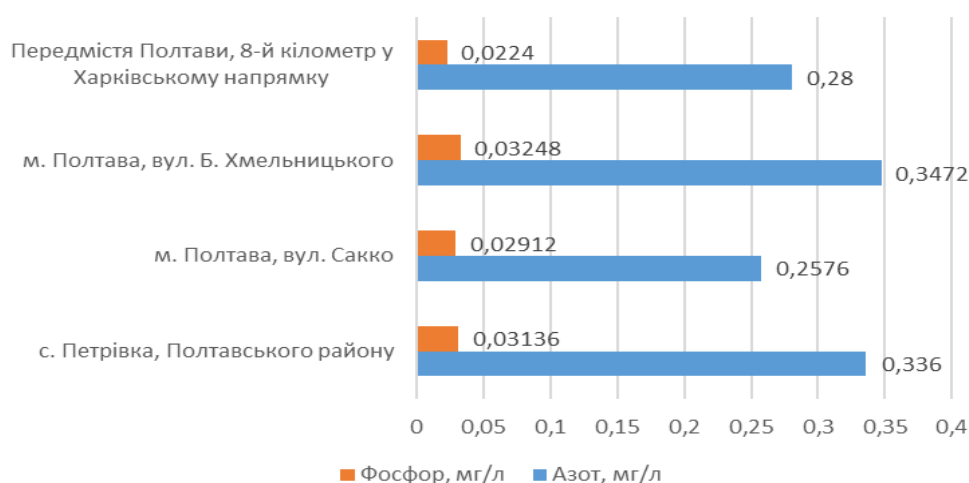


Рис. 2. Вміст біогенних речовин на різних ділянках річки Ворскли

Концентрації азоту та фосфору характеризують трофічність річки. Режим біогенних елементів розглядається як вихідний показник потенціальної евтрофікації.

Для моделювання процесів евтрофікації була розроблена стаціонарна одновимірна модель. Блок-схема моделі наведена на рис. 3. Стаціонарні стани системи описуються такими змінними: концентрація хлорофілу (як характеристика концентрації фітопланктону), концентраціями ортофосфату фосфору, амонійного азоту, нітратного азоту і відновленого з донних відкладень фосфору.

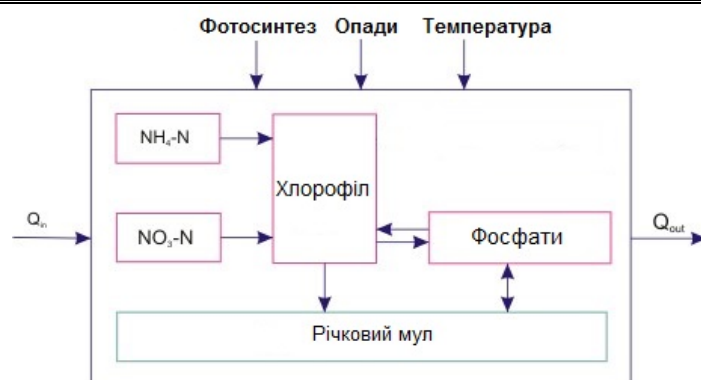


Рис. 3. Блок-схема моделі процесів евтрофікації

Ця модель була використана для моделювання динаміки поживних речовин у басейні річки Ворскла. Моделювання проводилося для двох різних ділянок: Петрівка, Полтавського району (Hv0170) та м. Полтава, вул. Б. Хмельницького (Hv0190). Як випливає з рис. 4, на динаміку фосфору впливають два різних процеси: зменшення концентрації фосфору внаслідок поглинання фітопланктону навесні діатомових водоростей і його збільшення восени внаслідок відновлення з донних відкладень.

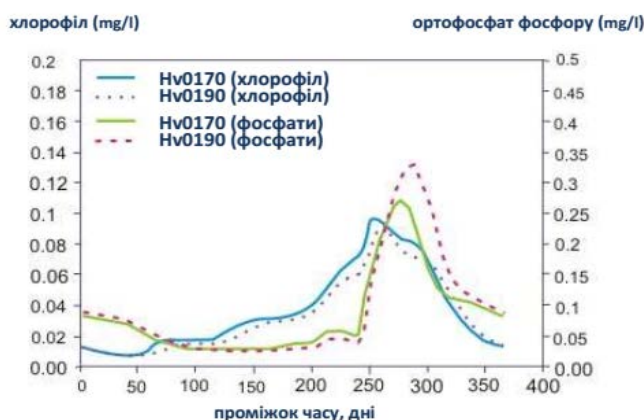


Рис. 4. Результати моделювання динаміки ортофосфату фосфору

Натомість невелике зменшення концентрації нітратного азоту спостерігається з початку року аж до кінця липня (рис. 5). Збільшення біомаси синьо-зелених водоростей зумовлює різке зменшення концентрації азоту. До кінця літа концентрація нітратів досягає початкових значень. Цей ефект пояснюється надходженням амонійного азоту зі стічними водами та переробкою бактеріями аміаку в нітрати, а також перенесенням забруднень у басейні річки.

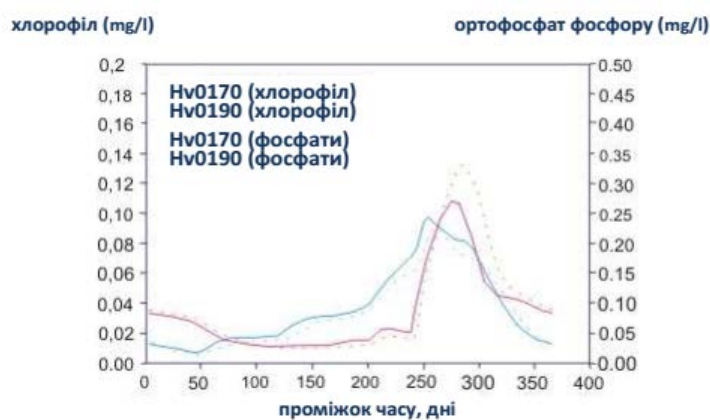


Рис. 5. Результати моделювання динаміки нітратного азоту

Для цілей управління якістю води в річці модель процесів евтрофікації була доповнена модулем оптимізації. Були розглянуті дві стратегії управління. Перша заснована на концепції ліміту поживних речовин. Друга використовує цільову функцію. Результати моделювання представлені на рис. 6 та рис. 7.

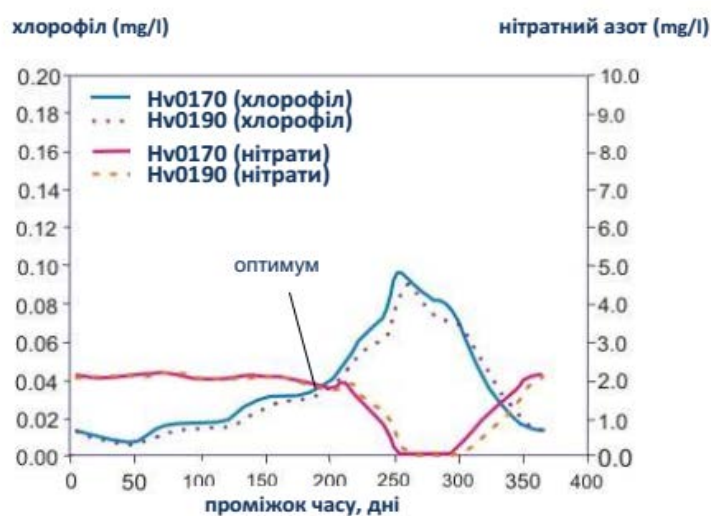


Рис. 6. Результати моделювання процесів управління якістю води на основі концепції ліміту поживних речовин

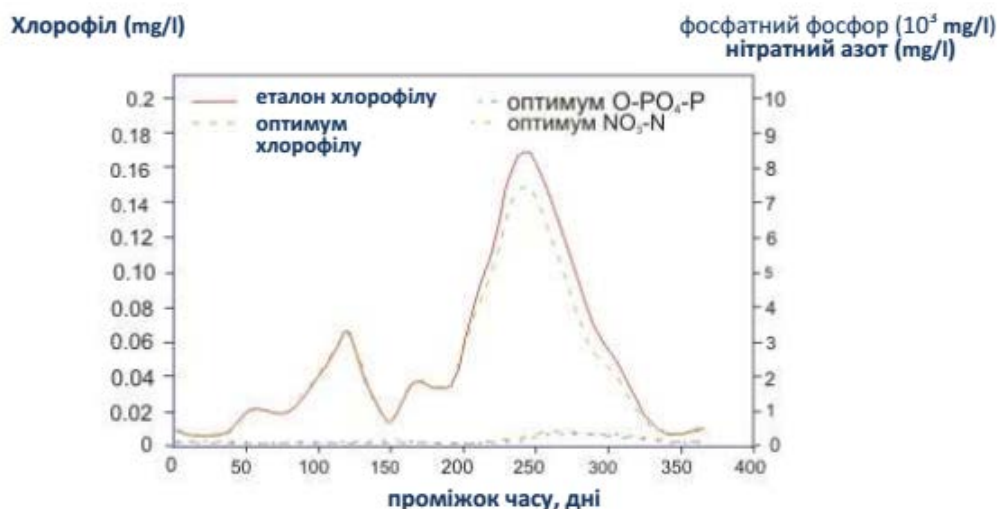


Рис. 7. Результати моделювання процесів управління якістю води на основі використання цільової функції

Аналізуючи літературні джерела, встановлено, що питаннями, пов'язаними з процесами евтрофікації водойм, у різні роки займалася велика кількість науковців з різних країн світу [23–26]. Варто зауважити, що підвищена зацікавленість науковців до цієї проблематики свідчить про перспективність розвідок у цьому напрямі, а отже, актуальність проведених нами досліджень не має сумніву.

Відмінність та унікальність проведених дослідів полягає в тому, що для експерименту з дослідження процесу евтрофікації води було використано зразки води з річки Ворскла (в різних районах м. Полтави та на околицях міста). У доступній літературі аналогічних робіт, що проводилися в цій місцевості, не виявлено.

Отже, проведені нами дослідження мають важливе теоретичне й практичне значення, адже дають змогу прогнозувати масове виникнення ціанобактерій не лише в річці Ворскла, а й в інших водоймах у літній період, та розробити заходи боротьби з цим негативним явищем.

Висновки

Результати математичного моделювання якості води свідчать, що вплив на процес лімітування евтрофікації призводить до збільшення концентрації поживних речовин і зниження концентрації фітопланктону. На динаміку фосфору також впливають два різних процеси: зменшення концентрації фосфору внаслідок поглинання фітопланктону навесні і його збільшення восени внаслідок віднов-

лення з донних відкладень. Збільшення хлорофілу (як характеристики біомаси синьо-зелених водоростей) викликає також різке зменшення концентрації азоту, майже до нуля. Проведене моделювання процесів управління якістю води (на прикладі річки Ворскла) на основі використання цільової функції, дозволило визначити оптимальний вміст біогенних речовин, що дає змогу тримати в оптимумі вміст хлорофілу. Використання стратегії, основаної на концепції ліміту поживних речовин, дозволила визначити оптимальний вміст нітратного азоту (2 мг/л і менше), при якому ріст ціанобактерій не інтенсифікується.

Перспективи подальших досліджень. Отже, подальші дослідження передбачають розробку рекомендацій щодо оптимізації параметрів, які впливають на евтрофікацію в літній період. Також на основі проведеного моделювання можливо здійснювати прогнозування масового виникнення ціанобактерій у водоймах влітку та розробляти заходи боротьби з цим негативним явищем.

References

1. Klymenko, M. O. (2006). *Monitorynh dovkillia*. Kyiv: Akademiia [In Ukrainian].
2. Yatsyk, A. V., & Shmakov, V. A. (2012). *Hidroekolohiia*. Kyiv: Urozhai [In Ukrainian].
3. Izrael, Yu. A. (1984). *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoj sredy*. Moskva: Gidrometeoizdat [In Russian].
4. Ferreira, J. G., Andersen, J. H., Borja, A., Bricker, S. B., Camp, J., Cardoso da Silva, M., Garcés, E., Heiskanen, A.-S., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hoepffner, N., & Claussen, U. (2011). Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93 (2), 117–131. doi: 10.1016/j.ecss.2011.03.014.
5. Yang, X., Wu, X., Hao, H., & He, Z. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 9 (3), 197–209. doi: 10.1631/jzus.b0710626.
6. Cloern, J. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223–253. doi: 10.3354/meps210223.
7. Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51 (1 part 2), 351–355. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351.
8. Backer, L. C. (2002). Cyanobacterial Harmful Algal Blooms (CyanoHABs): Developing a Public Health Response. *Lake and Reservoir Management*, 18 (1), 20–31. doi: 10.1080/07438140209353926.
9. Chorus, I., & Bartram, J. (Eds.). (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water*. doi: 10.4324/9780203478073.
10. Lahti, K., Rapala, J., Kivimäki, A.-L., Kukkonen, J., Niemelä, M., & Sivonen, K. (2001). Occurrence of microcystins in raw water sources and treated drinking water of Finnish waterworks. *Water Science and Technology*, 43 (12), 225–228. doi: 10.2166/wst.2001.0744.
11. Skulberg, O. M. (2005). Cyanobacteria/cyanotoxin research—Looking back for the future: The opening lecture of the 6th ICTC, Bergen, Norway. *Environmental Toxicology*, 20 (3), 220–228. doi: 10.1002/tox.20101.
12. Avramenko, N. I. (2014). SEZONNA MINLYVIST biohennykh rehovyn U richtsi Vorskla. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, (1), 115–120. doi: 10.31210/visnyk2014.01.28.
13. GOST 4192-82. Voda pitevaya. Metody opredeleniya mineralnykh azotsoderzhashih veshestv. (Dejstvuyushij ot 1983-01-01). (1983). Moskva [In Russian].
14. DSTU ISO 9297:2007 Yakist vody. Vyznachennia khlyorydiv. Tytruvannia nitratom sribla iz zastosuvanniam khromatu yak indykatora (metod Mora) (ISO 9297:1989, IDT). (*Chynnyi vid 2009-01-01*). (2009). Kyiv [In Ukrainian].
15. GOST 4389-72. Voda pitevaya. Metody opredeleniya sodержaniya sulfatov. (Dejstvuyushij ot 2018-09-12). (2018). Moskva [In Russian].
16. GOST 18309-72. Metod opredeleniya sodержaniya polifosfatov. (Dejstvuyushij ot 2018-09-12). (2012). Moskva [In Russian].
17. PND F 14.1;2.105-97. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii letuchih fenolov v prirodnyh i ochishennyh stochnyh vodah fotometricheskim metodom. (1997). Moskva [In Russian].
18. GOST 2477-65. Neft i nefteprodukty. Metod opredeleniya sodержaniya vody (s Izmeneniyami № 1, 2, 3). (Dejstvuyushij ot 2002-02-01). (2002). Moskva [In Russian].
19. GOST 18309-2014 Voda. Metody opredeleniya fosforsoderzhashih veshestv (s Popravkoj). (Dejstvuyushij ot 2016-01-01). (2016). Moskva [In Russian].

20. GOST 17.1.4.02-90. Voda. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya hlorofilla-a. (Dejstvuyushij ot 1991-01-01). (2019). Moskva [In Russian].
21. DSTU ISO 6060:2003. Yakist vody. Vyznachannia khimichnoi potreby v kysni (ISO 6060:1989, IDT). *Chynnyi vid 2003-06-10*. (2004). Kyiv [In Ukrainian].
22. Mathematical Modeling of Eutrophication Processes in Shallow Waters on Multiprocessor Computer System. (2016). *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Software Engineering"*, 5 (3). doi: 10.14529/cmse160303.
23. Vysockaya, E. V., Byh, A. I., Pecherskaya, A. I., Bespalov, Yu. G., Matvienko, R. V., & Tarasova, A. L. (2018). Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya evtrofikacii na strukturu i dinamiku otnoshenij v ozernom zooplanktone. *Sistemi Obrobki Informaciyi*, (4 (155)), 57–65. doi: 10.30748/soi.2018.155.08.
24. Porumb, F. (1992). On the development of *Noctiluca scintillans* under eutrophication of Romanian Black Sea waters. *Marine Coastal Eutrophication*, 907–920. doi: 10.1016/b978-0-444-89990-3.50078-x.
25. Ormerod, S. J. (1993). Control of eutrophication in inland waters. *Environmental Pollution*, 80(3), 309. doi: 10.1016/0269-7491(93)90057-u.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2019 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Писаренко П. В., Корчагін О. П. Прогнозування процесів евтрофікації водойм на прикладі річки Ворскла. *Вісник ПДАА*. 2019. № 3. С. 103–110.

© Писаренко Павло Вікторович, Корчагін Олександр Павлович, 2019