

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.01.062>

УДК [58.036.2:581.526.325.2](282.247.32)

В.І. Щербак, <https://orcid.org/0000-0002-1237-6465>

Н.Є. Семенюк, <https://orcid.org/0000-0003-4447-3507>

Н.В. Майстрова, <https://orcid.org/0000-0001-5335-4695>

Інститут гідробіології НАН України, Київ, Україна

E-mail: ek424nat@ukr.net

“Цвітіння” води верхньокаскадних дніпровських водосховищ у сучасних умовах

Представлена академіком НАН України С.О. Афанасьєвим

*У сучасних умовах доквілля “цвітіння” води верхньокаскадних дніпровських водосховищ зумовлено такими чинниками: глобальні кліматичні зміни, за яких найбільш адаптованими до зростання температур води є *Cyanobacteria*; концентрації неорганічного азоту і фосфору, які не лімітують розвиток ціанобактерій; набуті в процесі еволюції адаптивні механізми на популяційно-видовому та екосистемному рівні, що дають можливість *Cyanobacteria* домінувати у дніпровському фітопланктоні.*

Ключові слова: “цвітіння води”, *Cyanobacteria*, фітопланктон, зміни клімату, азот, фосфор, евтрофування, Дніпро, водосховища.

Вступ. Характерною ознакою багаторічної сукцесії біоти дніпровських водосховищ є “цвітіння” води, зумовлене масовим розвитком *Cyanobacteria*. *Cyanobacteria* є типовими представниками дніпровського фітопланктону і реєструвались у його домінантних комплексах ще до початку великомасштабного зарегулювання [1]. “Цвітінням” води вважається інтенсивний розвиток *Cyanobacteria* із величинами сирої біомаси понад 20,0 г/м³, які реєструються на більш ніж 50 % акваторії водойми [2]. У місцях вітрових “нагонів” можуть формуватися біомаси набагато вищі — до 3,0 кг/м³ [3]. Розвиток *Cyanobacteria* з біомасою до 20,0 г/м³ — це повністю контрольований екосистемою процес, який забезпечує потоки енергії, колообіг речовин, визначає якість водного середовища евтрофних екосистем.

Значним доробком Інституту гідробіології НАН України є фундаментальні роботи останніх десятиліть минулого сторіччя [3—5 та ін.], у яких встановлено закономірності “цвітіння” води та проаналізовано чинники, що визначали його інтенсивність на різних

Ц и т у в а н н я: Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Майстрова Н.В. “Цвітіння” води верхньокаскадних дніпровських водосховищ у сучасних умовах. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 1. С. 62—73. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.01.062>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

етапах генезису водосховищ. У сучасних умовах докільля, коли важливими чинниками стали глобальні кліматичні зміни, досліджено вплив аномально високих температур у дніпровських водосховищах на фітопланктон [6—9].

Максимальний рівень розвитку *Cyanobacteria* реєструвався в перші роки введення кожного з водосховищ до експлуатації. Повторні спалахи “цвітіння” були зумовлені непослідовністю введення водосховищ до експлуатації та розміщенням їх у каскаді. Наприклад, після введення до експлуатації Кременчуцького водосховища реєструвався повторний спалах “цвітіння” в розташованому нижче Каховському водосховищі. Аналогічне явище спостерігалось і в самому Кременчуцькому водосховищі після введення в експлуатацію Київського і Канівського водосховищ.

Стабілізація гідрологічного, гідрохімічного та гідробіологічного режимів після 1976 р. (закінчення будівництва Канівського водосховища) сприяла зменшенню “цвітіння” води з кінця 70-х до кінця 90-х рр. ХХ ст. [5, 6, 10].

Основними домінантами серед дніпровських *Cyanobacteria* є *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. scheremetieviae* (Elenkin) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis pulvereae* (H.C. Wood) Forti, *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek.

Зазначені види можуть формувати моно-, оліго- чи полідомінантний комплекс, склад та кількісний розвиток якого визначається низкою екологічних чинників, зокрема кліматичних. Як приклад наведемо ретроспективні й сучасні дані щодо біомаси *Cyanobacteria* в Канівському водосховищі і середньої температури повітря по м. Київ (табл. 1).

Результати порівняння ретроспективних і сучасних натурних даних свідчать про те, що з підвищенням температури зростає біомаса *Cyanobacteria* і змінюється співвідношення відділів у фітопланктоні. Знижуються кількісні показники *Vacillariophyta* і збільшуються *Chlorophyta* та, особливо, *Cyanobacteria*. Встановлені зміни є статистично достовірними як для головного в каскаді Київського, так і внутрішньокаскадного Канівського водосховища [6—8].

Паралельно з підвищенням температури в останні десятиліття спостерігається тенденція до зміни гідрохімічного режиму. Цей процес виявляється у зниженні вмісту азо-

Таблиця 1. Біомаса *Cyanobacteria*¹ у літньому фітопланктоні Канівського водосховища та середньомісячна (липень) температура повітря²

Рік	Біомаса <i>Cyanobacteria</i> , г/м ³		Середньомісячна температура повітря, °С
	Межі коливань	Середнє значення ± стандартна помилка	
1998	0,001—0,220	0,070 ± 0,020	19,5
2017	0,240—8,840	2,920 ± 1,310	20,9
2019	0,310—1,200	0,600 ± 0,160	19,8
2022	0,500—9,300	4,630 ± 2,550	22,3

¹ 1998 р. — згідно з [11]; 2017, 2019 рр. — згідно з [7]; 2022 р. — натурні дані.

² За даними Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського. Кліматичні дані по м. Київ [12].

ту та зростанні — фосфору [13—15]. Реєструються й зміни у величинах співвідношення $\Sigma N : P$ — сумарного азоту до розчиненого фосфору [16, 17].

Мета дослідження — встановлення відгуку (реакції) *Cyanobacteria* на зростання концентрації мінерального фосфору, зниження вмісту азоту, співвідношення $\Sigma N : P$, визначення їх біолого-екологічних характеристик на тлі аномального зростання температури води.

Методи і матеріали. Проаналізовано результати комплексних багаторічних натурних досліджень (2002—2022 рр.) гідрохімічного режиму та основних функціональних показників (чисельність і біомаса), які визначають фотосинтетичний і трофічний потенціал *Cyanobacteria*.

Перелік станцій спостережень, де паралельно відбиралися гідрохімічні й альгологічні проби, методи відбору, камерального і статистичного опрацювання опубліковано раніше [6, 14, 15]. Натурні дані статистично опрацьовані із застосуванням комп'ютерних програм MS Excel, Past 4.03.

Результати і їх обговорення. *Азот.* Результати сучасних досліджень на Київському та Канівському водосховищах [14, 15] показали значне зниження концентрацій неорганічного азоту порівняно з 60—90-ми рр. ХХ ст. У Канівському водосховищі сумарний вміст азоту в липні переважно коливався в межах 0,29—1,44 мг N/дм³. Вміст неорганічних форм можна подати у вигляді ранжируваного ряду: NH_4^+ (0,22—0,34 мг N/дм³) > NO_3^- (0,08—0,30 мг N/дм³) > NO_2^- (0,003—0,008 мг N/дм³). Винятками були два “точкові” джерела забруднення — стік р. Либідь і Бортницька станція аерації, де вміст азоту досягав 2,53 мг N/дм³, в основному за рахунок NO_3^- , що, очевидно, зумовлено впливом стічних вод м. Київ. У Київському водосховищі серед форм азоту переважає NH_4^+ , що визначається стоком р. Дніпро і, особливо, р. Прип'ять.

Такі концентрації азоту притаманні евтрофним екосистемам і є “надлишковими”, тобто не повністю використовуються водоростями. За сучасних умов, які характеризуються зниженням вмісту азоту, його “надлишкові” концентрації в екосистемах водосховищ свідчать про те, що цей біогенний елемент не є чинником, що лімітує вегетацію *Cyanobacteria*.

Встановлено статистично достовірну позитивну кореляцію між сумарним вмістом мінерального азоту і чисельністю та біомасою *Cyanobacteria* на прикладі Київського водосховища: для чисельності $r = 0,50$ при $p = 0,02$; для біомаси $r = 0,58$ при $p = 0,007$ (рис. 1). Аналогічну залежність отримано і для Канівського водосховища [14].

Водночас до домінантних комплексів літнього фітопланктону Київського та Канівського водосховищ входять гетероцистні ціанобактерії з роду *Dolichospermum* (= *Anabaena*), здатні до фіксації атмосферного азоту (N_2). Наприклад, у липні 2022 р. в акваторії Канівського водосховища біомаса *Dolichospermum flos-aquae* становила 0,085—1,383 г/м³. Очевидно, що цей феномен потребує додаткових спеціальних досліджень.

Фосфор. Аналіз багаторічного масиву даних з вмісту фосфору у воді і чисельності та біомаси *Cyanobacteria* в Київському водосховищі дав можливість отримати поліноміальну залежність між цими показниками (рис. 2). Коефіцієнти достовірності апроксимації є аналогічними для чисельності ($R^2 = 0,41$) і біомаси ($R^2 = 0,54$). Отже, дрібноклітинні і крупноклітинні форми *Cyanobacteria* однаково реагують на зміни концентрації фосфору.

Детальніший аналіз дає змогу виділити два модальних пули фосфору на отриманій кривій (див. рис. 2): 1 — від “слідових концентрацій” до 0,05 мг P/дм³, у межах якого спостерігається статистично достовірне зростання біомаси зі збільшенням концентрації фос-

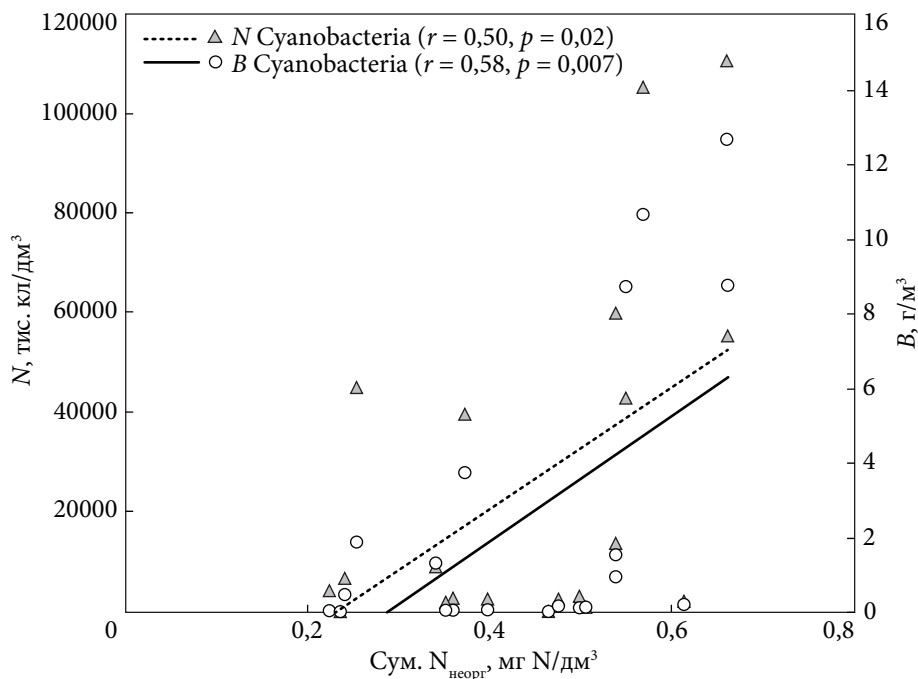


Рис. 1. Прямі достовірні кореляції між сумарним вмістом неорганічного азоту (Сум. $N_{\text{неорг}}$) і чисельністю (N) та біомасою (B) Сіанобактерія у фітопланктоні Київського водосховища (пелагіаль, поверхня). r — коефіцієнт кореляції, p — рівень значущості

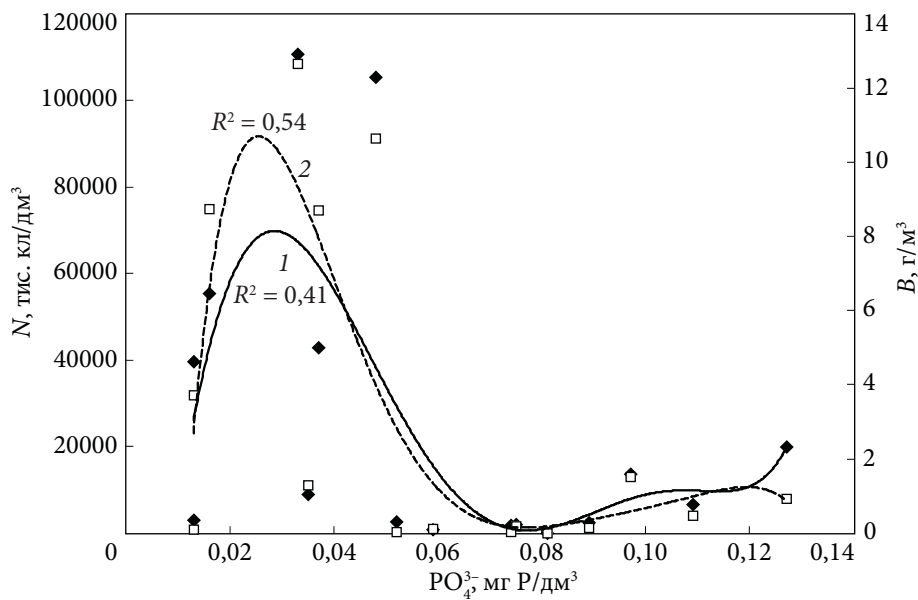


Рис. 2. Поліноміальна залежність між концентрацією фосфору (PO_4^{3-}) та чисельністю (1) і біомасою (2) Сіанобактерія в поверхневих горизонтах Київського водосховища (липень, багаторічні дані)

фору ($r = 0,74$; $p = 0,009$); 2 — понад $0,05 \text{ мг Р/дм}^3$, за якого відсутня статистично достовірна кореляція між вмістом фосфору і біомасою *Cyanobacteria* ($r = 0,65$; $p = 0,06$).

Отримані нами результати узгоджуються з літературними даними, які свідчать про те, що за вмісту фосфору у воді понад $0,05 \text{ мг Р/дм}^3$ він більше не лімітує розвиток фітопланктону і є надлишковим [18, 19].

Отже, отримані результати свідчать про те, що:

- на відміну від 60—70-х рр. ХХ ст., коли фосфор був лімітаційним чинником [4], на сьогодні він уже не лімітує розвиток *Cyanobacteria*;

- статистично достовірна позитивна кореляція в системі “фосфор — *Cyanobacteria*” спостерігається за вмісту $\text{PO}_4^{3-} \leq 0,05 \text{ мг Р/дм}^3$;

- можна допустити, що подальше зростання концентрацій фосфору в дніпровських водосховищах вже не матиме прямого впливу на розвиток *Cyanobacteria*, але це потребує додаткових комплексних досліджень співробітниками Інституту гідробіології НАН України;

- в евтрофних дніпровських водосховищах застосування “закону Фоленвайдера” [20], згідно з яким існує пряма залежність між вмістом фосфору та інтенсивністю розвитку фітопланктону, не є правомірним. Очевидно, що цей “закон” спрацьовує лише для оліготрофних-мезотрофних водойм, аналогічні результати отримані й іншими дослідниками [19, 21].

*Роль співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ у вегетації *Cyanobacteria*.* Багаторічними дослідженнями А.С. Редфілда [22] показано, що найтипівішим для озерного фітопланктону є співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ у межах 16 : 1. Однак А.Д. Приймаченко [4] наводить співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P} = 33 : 1$ як середнє значення для перших років існування Київського водосховища (1965—1970 рр.).

Співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$, розраховане за ретроспективними даними для незарегульованого Дніпра з мезотрофним статусом у межах міст Київ—Канів [23—25], у 1951—1954 і 1961—1965 рр. становило 13 : 1 та 18 : 1 відповідно. У наш час, коли Канівське водосховище в літній період “цвітіння” води є евтрофною екосистемою, співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ становить $6,6 \pm 0,4$ [17]. Цікаво, що навесні і восени, коли “цвітіння” не спостерігається і відбувається перехід екосистеми до мезотрофно-евтрофного типу, цей показник зростав до $21,5 \pm 1,8$ і $17,0 \pm 0,9$.

Згідно з ретроспективними даними, для Київського водосховища у 1965—1985 рр. співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ коливалося в межах 19,8—67,7 [23, 24], а в наш час цей показник був у межах 1,9—42,3 із середнім значенням $5,7 \pm 0,9$ [17]. Аналогічні межі коливань (3,4—27,3) отримані й за літній період 2017—2022 рр.¹

На основі літературних і авторських матеріалів увесь масив натурних даних стосовно співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ був диференційований на три пули: перший — $\Sigma \text{N} : \text{P} < 9,9$; другий — 10,0—29,9; третій — $>30,0$. Аналіз зв'язку між $\Sigma \text{N} : \text{P}$ та чисельністю і біомасою фітопланктону показав, що він має вигляд параболи з максимальними показниками за співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ у межах 10,0—29,9 (рис. 3, а, б).

Специфічна реакція функціональних показників *Cyanobacteria* на різні співвідношення $\Sigma \text{N} : \text{P}$ підтверджується узагальненими даними щодо чисельності та біомаси (табл. 2) і

¹ Автори щиро вдячні мол. наук. співроб. М.І. Лінчук за дані щодо вмісту азоту і фосфору за 2017—2022 рр., отримані під час виконання спільних комплексних науково-дослідних робіт Інституту гідробіології НАН України.

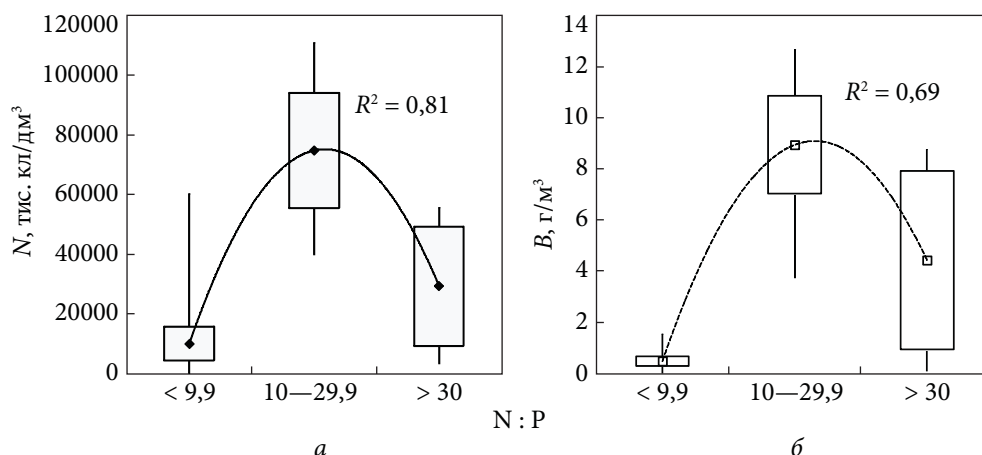


Рис. 3. Параболічна залежність між співвідношенням $\Sigma N : P$ та чисельністю (а) і біомасою (б) *Cyanobacteria* у фітопланктоні Київського водосховища

узгоджується з результатами, отриманими іншими дослідниками на озерному [21, 26, 27] і морському [28] фітопланктоні.

Отримані дані дають підставу стверджувати, що в останні два десятиліття співвідношення $\Sigma N : P < 9,9$ у Київському та Канівському водосховищах не є оптимальним для вегетації *Cyanobacteria*. При цьому найвищий рівень трофності за чисельністю і біомасою *Cyanobacteria* (евтрофно-гіперевтрофний) спостерігається за співвідношення $\Sigma N : P$ у межах 9,9—29,9. Відповідно, актуальним є з’ясування механізмів впливу “надлишкових” концентрацій мінерального азоту, фосфору, “низького” співвідношення $\Sigma N : P$ не тільки на *Cyanobacteria*, а й на інші відділи водоростей у високоевтрофних дніпровських водосховищах: *Vacillariophyta*, *Chlorophyta*, *Miozoa*. Тим паче, що в сучасних умовах у континентальних водоймах і водотоках спостерігається зростання концентрацій фосфатів [29]. Очевидно, ці глобальні проблеми будуть одним із наступних напрямів комплексних досліджень Інституту гідробіології НАН України.

Біолого-екологічні характеристики Cyanobacteria. *Cyanobacteria* — це найдавніші хлорофілоносні рослини гідросфери, які сформували кисневу оболонку Землі. У процесі еволюції ціанобактеріями був набутий потужний адаптативний потенціал, який дав їм можливість домінувати в різномісних екосистемах світу. На сьогодні всі складові їхніх

Таблиця 2. Чисельність (*N*) і біомаса (*B*) *Cyanobacteria* за різних величин $\Sigma N : P$ у Київському водосховищі (узагальнені дані по акваторії за липень)

Показники <i>Cyanobacteria</i>	Співвідношення $\Sigma N : P$		
	< 9,9	10,0—29,9	> 30,0
<i>N</i> , тис. кл/дм ³	$\frac{34,0—60009,0}{9952,0}$	$\frac{3903,0—110749,0}{74704,0}$	$\frac{3074,0—55448,0}{29261,0}$
<i>B</i> , г/м ³	$\frac{0,006—1,524}{0,479}$	$\frac{3,727—12,662}{8,938}$	$\frac{0,106—8,748}{4,427}$

Примітка. Над рискою — межі коливань, під рискою — середнє значення.

адаптаційних механізмів поки не встановлено, тому нижче наведемо тільки ті, які вже науково обґрунтовані.

1. Біологічні механізми: а) питома вага *Cyanobacteria* значно менша, ніж у інших водоростей; б) газові вакуолі, які знижують питому вагу клітин; в) наявність додаткових пігментів, окрім хлорофілу *a* (каротиноїдів, ксантофілів, антоціанів, фікоеритринів з максимумом поглинання квантів світла 380—560 нм); г) здатність до запасання сполук фосфору; д) здатність до фіксації атмосферного азоту (N_2); е) можливість гетеротрофного та міксотрофного живлення [30].

2. Екологічні механізми: а) відношення площі клітин до об'єму зазвичай $>2,0$, що значно вище, ніж у *Bacillariophyta*, *Miozoa* чи *Chlorophyta* [10], і, відповідно, більш ефективне поглинання поживних речовин та виведення екзометаболітів; б) висока фотосинтетична активність з добовими Р/В-коефіцієнтами до 9,0—12,0, що забезпечує швидке накопичення біомаси [10]; в) утворення великих колоній, недоступних для виїдання планктонними альгофагами (*Cladocera*, *Copepoda*, *Protozoa*) [31]; г) формування поверхневої плівки, яка “екранує” водну товщу і позбавляє інших представників фітопланктону джерела сонячної радіації; д) вироблення токсичних екзометаболітів (мікроцистин, афанотоксин тощо), які мають алелопатичний ефект для інших водоростей; ж) високий вміст білкових та інших високомолекулярних сполук, під час лізису яких виділяються феноли, бензоли тощо, що негативно впливають на інші види гідробіонтів.

Важливими є екологічні чинники останніх років: відносно “теплі зими”, впродовж яких по акваторіях водосховищ не формується потужний льодовий покрив, що покращує умови “зимування” водоростей на донних відкладах; відсутність значних весняних повеней, які мали самоочисний екосистемний ефект, “змиваючи” форми *Cyanobacteria*, що зимують, вниз по каскаду; останні маловодні роки з відповідним зниженням швидкості течії, що сприяє розвитку лімнофільних *Cyanobacteria*.

Отже, набуті в процесі еволюційного розвитку адаптаційні механізми разом із більшою температурною толерантністю і особливостями біогенного живлення дають можливість *Cyanobacteria* домінувати в літньому фітопланктоні різнотипних континентальних гідроекосистем у сучасних умовах.

Сучасні підходи до оптимізації “цвітіння” води дніпровських водосховищ. “Цвітіння” води дніпровських водосховищ – це природна реакція (відгук) на зміну екологічних умов, зумовлену зарегулюванням Дніпра [2, 8], і проголошена в 60—90-х рр. ХХ ст. “боротьба з “цвітінням” води” була, безперечно, помилковою. Нині очевидно, що за інтенсивного “цвітіння” води необхідно мати різні методи, які можуть його оптимізувати.

Безперечними здобутками вчених НАН України, актуальними і сьогодні, є багаторічні напрацювання співробітників Інституту гідробіології під керівництвом О.В. Топачевського та Л.Я. Сіренко: 1) штучне насичення водної товщі киснем за допомогою плавучих насосних станцій, які працювали від енергії вітру; 2) локальне використання різних видів альгіцидів; 3) механічне видалення водоростей з подальшим переробленням водоростевої маси на хлорофіл-каротин-білкову “пасту” і виготовленням з неї цінних харчових добавок; 4) інтродукція далекосхідних риб-фітофагів — білого товстолоба, основним харчовим ресурсом якого є водорості; 5) використання природного біоплато — вищих водяних рослин, які механічно затримують клітини *Cyanobacteria* і є конкурентами за біогенні елементи та сонячну радіацію.

Ще одним біологічним методом є використання інших видів водоростей, зокрема з роду *Chlorella*, як конкурента за біогенний ресурс [32]. Однак на великих водних об'єктах застосовувати цей метод недоцільно через короткий вегетаційний період хлорели і меншу питому вагу ціанобактерій, які “екрануватимуть” клітини хлорели від сонячної радіації, а також значні економічні витрати.

Перспективним напрямом оптимізації “цвітіння” є зміна гідрологічного режиму роботи дніпровських ГЕС [33]. Очевидно, що оптимізація “цвітіння” води потребує подальших досліджень.

Висновки. Наведені натурні матеріали і узагальнення низки авторських публікацій дають підставу стверджувати, що в сучасних умовах докільля “цвітіння” води дніпровських водосховищ зумовлено такими чинниками.

1. Глобальні кліматичні зміни, за яких найбільш адаптованими до зростання температур води є *Cyanobacteria*.

2. Наявний біогенний режим повною мірою забезпечує життєдіяльність синьозеленого планктону, і мінеральні форми азоту і фосфору не є чинниками, що лімітують “цвітіння” води як у головному Київському, так і внутрішньокаскадному Канівському водосховищі.

3. Сучасне співвідношення $\Sigma N : P$ (у середньому $< 9,9$) не є оптимальним для вегетації *Cyanobacteria*, максимальні величини чисельності й біомаси яких реєструються за співвідношенням $\Sigma N : P$ у межах 10—30.

4. Набуті в процесі багатовікової еволюції адаптивні механізми як на популяційно-видовому, так і на екосистемному рівні дають можливість *Cyanobacteria* домінувати у дніпровському фітопланктоні.

5. Важливим напрямом роботи Інституту гідробіології є й будуть подальші дослідження, спрямовані на встановлення еколого-біологічних механізмів, що дають можливість *Cyanobacteria* домінувати в сучасних умовах докільля, а також визначення можливих прямих чи опосередкованих наслідків віроломної агресії рф, розроблення основних науково-практичних рекомендацій з оптимізації “цвітіння” води і використання отриманих результатів для сучасних потреб українського соціуму.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ролл Я.В. До вивчення фітопланктону середньої течії Дніпра. *Зб. праць Дніпров. біол. ст.* 1930. Ч. 5, № 3. С. 269—296.
2. Щербак В.И. Многолетняя динамика “цветения” воды днепровских водохранилищ. *Доп. НАН України.* 1998. № 7. С. 187—190.
3. “Цветение” воды: Топачевский А.В. (ред.). Вып. 1. Киев: Наук. думка, 1968. 388 с.
4. Приймаченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1981. 278 с.
5. Растительность и бактериальное население Днепра и его водохранилищ: Кондратьева Н.В. (отв. ред.). Киев: Наук. думка, 1989. 232 с.
6. Shcherbak V.I. Response of phytoplankton of the Kiev Reservoir to the increase in summer temperatures. *Hydrobiol. J.* 2019. 55, № 1. P. 18—35. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i1.20>
7. Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Yakushyn V.M. Phytoplankton structural and functional organization in a large lowland reservoir under the global climate change (case study of the Kaniv Reservoir). *Hydrobiol. J.* 2022. 58, № 6. P. 3—27. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v58.i6.10>
8. Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Maistrova N.V. Characteristics of Cyanobacteria at different stages of existence of the Kyiv Reservoir. *Hydrobiol. J.* 2024. 60, № 1. P. 3—27. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v60.i1.10>

9. Семенюк Н.Є., Щербак В.І., Давидов О.А., Козійчук Е.ІІІ. Динаміка локальних угруповань фітопланктону верхньокаскадних дніпровських водосховищ у сучасних умовах. *Альгологія*. 2025. **35**, № 1. С. 30—57. <https://doi.org/10.15407/alg35.01.030>
10. Shcherbak V.I. Primary production of algae in the Dnieper and Dnieper Reservoirs. *Hydrobiol. J.* 1999. **35**, № 1. P. 1—13. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v35.i1.10>
11. Щербак В.І., Майстрова Н.В. Фітопланктон кївської ділянки Канівського водоймища та чинники, що його визначають. Київ: Ін-т гідробіології НАН України, 2001. 70 с.
12. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Кліматичні дані по м. Київ. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>. (Дата звернення: 27.10.2023).
13. Линник П.Н. Формирование гидрохимического режима водохранилищ. *Гидроэнергетика и окружающая среда*: Ландау Ю., Сиренко Л. (ред.). Киев: Либра, 2004. С. 219—236.
14. Shcherbak V.I., Yakushin V.M., Zadorozhnaya A.M., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiol. J.* 2016. **52**, № 1. P. 49—61. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50>
15. Yakushin V.M., Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiol. J.* 2017. **53**, № 6. P. 96—109. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100>
16. Ліщук А.В. Еколого-фізіологічні основи формування фітопланктону прісноводних екосистем: автореф. дис. ... д-ра біол. наук / Інститут гідробіології НАН України. Київ, 2007. 38 с.
17. Щербак В.І., Майстрова Н.В. Реакція дніпровського фітопланктону на зміну біогенного режиму. *Перспективи гідроекологічних досліджень в контексті проблем довкілля та соціальних викликів*: Збірник матеріалів VIII з'їзду Гідроекологічного товариства України (Київ, 6—8 лист. 2019). Київ, 2019. С. 100—102.
18. Jørgensen S.E. Lake Management. Oxford: Pergamon Press, 1980. 167 p.
19. Qi J., Deng L., Song Y., Qi W., Hu C. Nutrient thresholds required to control eutrophication: does it work for natural alkaline lakes? *Water*. 2022. **14**, № 17. 2674. <https://doi.org/10.3390/w14172674>
20. Vollenweider R.A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development, 1968. 159 p.
21. Wang H.-J., Liang X.-M., Jiang P.-H., Wu S.-K., Wang H.-Z. TN : TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lake. *Freshw. Biol.* 2008. **53**, № 5. P. 935—944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01950.x>
22. Redfield A.C. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 1958. **46**. P. 205—221.
23. Денисова А.І. Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. Киев: Наук. думка, 1979. 289 с.
24. Денисова А.І. Гидрохимический режим водохранилищ. *Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ*; Шевченко М.А. (ред.). Киев: Наук. думка, 1989. С. 116—169.
25. Гидробиологический режим Днепра в условиях зарегулированного стока: Цееб Я.Я. (отв. ред.). Киев: Наук. думка, 1967. 387 с.
26. Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* 1982. **27**, № 6. P. 1101—1112. <https://doi.org/10.4319/lo.1982.27.6.1101>
27. Quinlan R., Filazzola A., Mahdiyan O., Shuvo A., Blagrave K., Ewins C., Moslenko L., Gray D.K., O'Reilly C.M., Sharma S. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. *Limnol. Oceanogr.* 2021. **66**, № 2. P. 392—404. <https://doi.org/10.1002/lno.11611>
28. Wan Z., Jonasson L., Bi H. N/P ratio of nutrient uptake in the Baltic Sea. *Ocean Sci.* 2011. **7**, № 5. P. 693—704. <https://doi.org/10.5194/os-7-693-2011>
29. Fink G., Alcamo J., Flörke M., Reder K. Phosphorus loadings to the world's largest lakes: sources and trends. *Global Biogeochem. Cy.* 2018. **32**, № 4. P. 617—634. <https://doi.org/10.1002/2017GB005858>
30. Shcherbak V.I., Kuzmenko M.I. Intensity of photosynthesis by phytoplankton at various depths in the photic zone. *Hydrobiol. J.* 1987. **23**, № 2. P. 20—25.
31. Shcherbak V.I., Zhdanova G.A. Use of P/B coefficient of algae as a measure of the effect of zooplankton on primary production of phytoplankton. *Hydrobiol. J.* 1988. **24**, № 5. P. 78—79.

32. Boonbangkeng D., Treesubuntorn C., Krobthong S., Yingchutrakul Y., Pekkoh J., Thiravetyan P. Using cell-free supernatant of *Bacillus* sp. AK3 in combination with *Chlorella* to remove harmful algal bloom species, TP, TN, and COD from water. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. **10**, № 6. 108645. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108645>
33. Dubniak S.S. Ecological aspects of the hydrological regime of the Kiev section of the Kaniv Reservoir. *Hydrobiol. J.* 2001. **37**, № 5. P. 67—78. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v37.i5.60>

Надійшла до редакції 02.10.2025

REFERENCES

1. Roll, Ya. V. (1930). The question of phytoplankton of the middle reaches of the Dnieper. Zbirnyk prats Dniprovskoi biolohichnoi stantsii, Pt. 5, No. 3, pp. 269-296 (in Ukrainian).
2. Shcherbak, V. I. (1998). Long-term dynamics of algal blooms in the Dnieper reservoirs. *Dop. NAN Ukrainy*, No. 7, pp. 187-190 (in Russian).
3. Topachevskiy, A. V. (Ed.). (1968). Algal Blooms. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
4. Priymachenko, A. D. (1981). Phytoplankton and primary production of the Dnieper and the Dnieper reservoirs. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
5. Kondratieva, N.V. (Ed.). (1989). Vegetation and bacterial population of the Dnieper and its reservoirs. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
6. Shcherbak, V. I. (2019). Response of phytoplankton of the Kiev Reservoir to the increase in summer temperatures. *Hydrobiol. J.*, 55, No. 1, pp. 18-35. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i1.20>
7. Shcherbak, V. I., Semenyuk, N. Ye. & Yakushyn, V. M. (2022). Phytoplankton structural and functional organization in a large lowland reservoir under the global climate change (case study of the Kaniv Reservoir). *Hydrobiol. J.*, 58, No. 6, pp. 3-27. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v58.i6.10>
8. Shcherbak, V.I., Semenyuk, N.Ye. & Maistrova, N. V. (2024). Characteristics of Cyanobacteria at different stages of existence of the Kyiv Reservoir. *Hydrobiol. J.*, 60, No. 1, pp. 3-27. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v60.i1.10>
9. Semeniuk, N. Ye., Shcherbak, V. I., Davydov, O. A. & Koziychuk, E. Sh. (2025). Dynamics of local phytoplankton communities in the upper-cascade Dnieper reservoirs under present conditions. *Algologia*, 35, No. 1, pp. 30-57 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/alg35.01.030>
10. Shcherbak, V. I. (1999). Primary production of algae in the Dnieper and Dnieper Reservoirs. *Hydrobiol. J.*, 1999, 35, No. 1, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v35.i1.10>
11. Shcherbak, V. I. & Maistrova, N. V. (2001). Phytoplankton of the Kyiv section of the Kaniv Reservoir and factors driving its development. Kyiv: Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
12. Boris Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Climate data for the city of Kyiv. 2023. Retrieved from <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>
13. Linnik, P. N. (2004). Formation of hydrochemical conditions in the water reservoirs. In: Landau, Yu. & Sirenko, L. (Eds.). *Hydropower and Environment* (pp. 219-236). Kyiv: Libra (in Russian).
14. Shcherbak, V. I., Yakushin, V. M., Zadorozhnaya, A. M., Semenyuk, N. Ye. & Linchuk, M. I. (2016). Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kaniv Reservoir. *Hydrobiol. J.*, 52, No. 1, pp. 49-61. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50>
15. Yakushin, V. M., Shcherbak, V. I., Semenyuk, N. Ye. & Linchuk, M. I. (2017). Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiol. J.*, 2017, 53, No. 6, pp. 96-109. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100>
16. Lishchuk, A. V. (2007). Ecological and physiological fundamentals of phytoplankton development in the freshwater ecosystems. (Extended abstract of Doctor thesis). Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine (in Ukrainian).
17. Shcherbak, V. I. & Maistrova, N. V. (2019, November). Response of the Dnieper phytoplankton to the change in the nutrient conditions. *Proceedings of the 8th Congress of the Hydroecological Society of Ukraine Prospects of hydroecological research in the context of environmental problems and social challenges* (pp. 100-102). Kyiv (in Ukrainian).
18. Jørgensen, S. E. (1980). *Lake Management* Oxford: Pergamon Press.
19. Qi, J., Deng, L., Song, Y., Qi, W. & Hu, C. (2022). Nutrient thresholds required to control eutrophication: does it work for natural alkaline lakes? *Water*, 14, No. 17, 2674. <https://doi.org/10.3390/w14172674>

20. Vollenweider, R. A. (1968). Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development.
21. Wang, H.-J., Liang, X.-M., Jiang, P.-H., Wu, S.-K. & Wang, H.-Z. (2008). TN : TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lake. *Freshw. Biol.*, 53, No. 5, pp. 935-944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01950.x>
22. Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 46, pp. 205-221.
23. Denisova, A. I. (1979). Formation of hydrochemical conditions in the Dnieper water reservoirs and methods of its forecasting. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
24. Denisova, A. I. (1989). Hydrochemical conditions in the water reservoirs. In: Shevchenko, M. A. (Ed.). *Hydrology and Hydrochemistry of the Dnieper and its Reservoirs* (pp. 116-169). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
25. Tseeb, Ya. (Ed.). (1967). *Hydrobiological regime of the Dnieper under conditions of regulated flow*. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
26. Smith, V. H. (1982). The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 27, No. 6, pp. 1101-1112. <https://doi.org/10.4319/lo.1982.27.6.1101>
27. Quinlan, R., Filazzola, A., Mahdiyan, O., Shuvo, A., Blagrove, K., Ewins, C., Moslenko, L., Gray, D. K., O'Reilly, C. M. & Sharma, S. (2021). Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. *Limnol. Oceanogr.*, 66, No. 2, pp. 392-404. <https://doi.org/10.1002/lno.11611>
28. Wan, Z., Jonasson, L. & Bi, H. (2011). N/P ratio of nutrient uptake in the Baltic Sea. *Ocean Sci.*, 7, No. 5, pp. 693-704. <https://doi.org/10.5194/os-7-693-2011>
29. Fink, G., Alcamo, J., Flörke, M. & Reder, K. (2018). Phosphorus loadings to the world's largest lakes: sources and trends. *Global Biogeochem. Cy.*, 32, No. 4, pp. 617-634. <https://doi.org/10.1002/2017GB005858>
30. Shcherbak, V. I. & Kuzmenko, M. I. (1987). Intensity of photosynthesis by phytoplankton at various depths in the photic zone. *Hydrobiol. J.*, 23, No. 2, pp. 20-25.
31. Shcherbak, V. I. & Zhdanova, G. A. (1988). Use of P/B coefficient of algae as a measure of the effect of zooplankton on primary production of phytoplankton. *Hydrobiol. J.*, 24, No. 5, pp. 78-79.
32. Boonbangkeng, D., Treesubuntorn, C., Krobthong, S., Yingchutrakul, Y., Pekkoh, J. & Thiravetyan, P. (2022). Using cell-free supernatant of *Bacillus* sp. AK3 in combination with *Chlorella* to remove harmful algal bloom species, TP, TN, and COD from water. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10, No. 6, 108645. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108645>
33. Dubniak, S. S. (2001). Ecological aspects of the hydrological regime of the Kiev section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiol. J.*, 37, No. 5, pp. 67-78. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v37.i5.60>

Received 02.10.2025

V.I. Shcherbak, <https://orcid.org/0000-0002-1237-6465>

N.Ye. Semeniuk, <https://orcid.org/0000-0003-4447-3507>

N.V. Maistrova, <https://orcid.org/0000-0001-5335-4695>

Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: ek424nat@ukr.net

HARMFUL ALGAL BLOOMS IN UPPER-CASCADE DNIEPER RESERVOIRS UNDER PRESENT CONDITIONS

On the grounds of the complex long-term field observations, the paper considers the Cyanobacteria response to the increase in the inorganic phosphorus content, the decline in the nitrogen content and $\Sigma N:P$ ratio and describes the biological and ecological characteristics of Cyanobacteria on the background of abnormal rise in the water temperature. A significant positive correlation was found between the total inorganic nitrogen content and the number of cyanobacterial cells and biomass in Kyiv and Kaniv Reservoirs (for cell count: $r = 0.50$, $p = 0.02$; for biomass $r = 0.58$, $p = 0.007$). A curvilinear relation has been obtained between Cyanobacteria biomass and phosphorus content. A more detailed analysis of the graph makes it possible to distinguish two ranges of phosphorus content: 1st — from trace concentrations to 0.05 mg P/dm^3 , within which there is a statistically significant correlation between phosphorus and Cyanobacteria biomass ($r = 0.74$; $p = 0.009$); 2nd — above 0.05 mg P/dm^3 , where there is no significant correlation between phosphorus and Cyanobacteria biomass. It can be predicted that a further increase in phosphorus content in the Dnieper reservoirs will no longer have a direct impact on the development of Cyanobacteria, but this requires additional comprehensive research. The relation between the $\Sigma N:P$ ratio and the number of phytoplankton cells (biomass) represents a parabolic curve with the maximum values within the $\Sigma N:P$ ratio 10.0—29.9. Under present environmental conditions harmful algal blooms in the upper-cascade Dnieper reservoirs are driven by the following factors: global climate change, as Cyanobacteria are the most adapted to increase in water temperature; inorganic nitrogen and phosphorus content, which do not limit Cyanobacteria growth; adaptation mechanisms of Cyanobacteria on the species-population and ecosystem levels developed in the course of evolution, which allow Cyanobacteria to dominate in the phytoplankton of the Dnieper.

Keywords: harmful algal blooms, Cyanobacteria, phytoplankton, climate change, nitrogen, phosphorus, eutrophication, Dnieper River, water reservoirs.