

ОЦІНКА СКЛАДНОСТІ СТРУКТУРИ ФІТОПЛАНКТОНУ РІЗНОТИПНИХ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ

Шелюк Ю.С.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. В. Бердичівська, 40, 10002, м. Житомир
Shelyuk_Yulya@ukr.net

У роботі представлено порівняння інформаційного різноманіття фітопланктону за індексом Шеннона (H_b) водних екосистем басейнів головних річок Українського Полісся – Прип'яті і Тетерева – від природних вод до антропогенно змінених та штучних водних об'єктів, які відрізняються умовами існування гідробіонтів та рівнем антропогенного навантаження. З'ясовано вплив факторів середовища на складність структури водоростевих угруповань. Показано, що найбільшу складність структури угруповань мають річкові екосистеми. Його зниження відбувається в напрямку: річки ($H_b=1,89\pm 0,02$ біт/мг) → водосховища ($H_b=1,76\pm 0,03$ біт/мг) → озера ($H_b=1,64\pm 0,05$ біт/мг) → водойми, які виникли на місці кар'єрів із видобутку корисних копалин ($H_b=1,62\pm 0,10$ біт/мг). Попередніми дослідженнями авторки встановлено, що такий самий ряд формують водні об'єкти поліського регіону й за часткою виявлених у них видів-домінантів, а також видів водоростей планктону із високою частотою трапляння (понад 50%), що пояснюється збільшенням монотонності умов існування при переході від лотичних умов до лентичних.

Зростання вмісту загального нітрогену, а у водосховищах – фосфору фосфатів обумовлює зменшення інформаційного різноманіття водоростевих угруповань, а отже зменшення їх складності. Пряма залежність між середніми значеннями індексу Шеннона і родовими коефіцієнтами є підтвердженням того, що спрощення таксономічної структури фітопланктону обумовлює й зниження інформаційного різноманіття. У штучно створених (кар'єрах) й антропогенно змінених (водосховищах) водних екосистемах зміни інформаційного різноманіття лімітуються температурним чинником ($r=0,54$ при $n=270$ і $r=-0,19$ при $n=150$), а отже в умовах змін клімату складність структури фітопланктону цих водойм може зазнавати помітних змін.

При усередненні величин індексу Шеннона за рангами біомаси було встановлено, що максимальні значення інформаційного різноманіття у водотоках та створених на них водосховищах знаходяться в діапазоні біомаси від 2 до 5 мг/дм³, в озерах і кар'єрах – близько 1 мг/дм³. *Ключові слова:* фітопланктон, інформаційне різноманіття, Полісся, біомаса, індекс Шеннона.

Assessment of the complexity of the phytoplankton structure of different types of aquatic ecosystems of the Ukrainian forest. Sheliuk Yu.

The paper compares the information diversity of phytoplankton according to the Shannon (H_b) index of aquatic ecosystems of the main watercourses Polesye – Prypiat River and the Teteriv River from natural waters to anthropogenically modified and artificial water bodies, which differ in the conditions of existence of aquatic organisms and the level of anthropogenic load. The influence of environmental factors on the complexity of the structure of algae groups has been clarified. It is shown that river ecosystems have the greatest complexity of group structure. Its decrease occurs in the direction: rivers ($H_b = 1.89 \pm 0.02$ bit / mg) → reservoirs ($H_b = 1.76 \pm 0.03$ bit / mg) → lakes ($H_b = 1.64 \pm 0.05$ bit / mg) → reservoirs that arose on the site of mining quarries ($H_b = 1.62 \pm 0.10$ bit / mg). Previous studies have shown that the same number of water bodies of the Polesye region and the share of dominant species found in them, as well as species of plankton algae with a high frequency of occurrence (over 50%), due to increasing monotony of living conditions in the transition from conditions to tape.

The increase in the content of total nitrogen, and in reservoirs – phosphorus phosphates leads to a decrease in the information diversity of algae groups, and thus reduce their complexity. The direct relationship between the average values of the Shannon index and generic coefficients is evidence that the simplification of the taxonomic structure of phytoplankton leads to a decrease in information diversity. In artificially created (quarries) and anthropogenically modified (reservoirs) aquatic ecosystems, changes in information diversity are limited by the temperature factor ($r = 0.54$, $n = 270$ and $r = -0.19$ at $n = 150$), and therefore in conditions of change climate complexity of their phytoplankton structure may undergo significant changes.

By averaging the Shannon index by biomass rankings, it was found that the maximum values of information diversity in watercourses and reservoirs created on them are in the range of biomass from 2 to 5 mg / dm³, in lakes and quarries – more than 1 mg / dm³. *Key words:* phytoplankton, information diversity, Polesye region, biomass, Shannon index.

Постановка проблеми. Важливим показником стану водних екосистем є складність структури угруповань водоростей: чим вище інформаційне різноманіття, тим стабільніші угруповання. У гідробіологічній практиці для оцінки стану біоти одним із найчастіше вживаних є індекс Шеннона [1].

Актуальність дослідження. Пізнання закономірностей структурно-функціональної організа-

ції екосистем формує теоретичне підґрунтя для оцінки їх стану, прогнозу змін, раціонального використання водних ресурсів. Досі у науковій літературі немає чіткого уявлення про механізми формування складності структури фітопланктону в градієнті залежності від антропогенного навантаження попри регулярність його вивчення на окремих водних об'єктах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Українське Полісся багате на водойми й водотоки різних типів із відмінним рівнем антропогенного навантаження. Визначення та порівняння інформаційного різноманіття фітопланктону за індексом Шеннона (H_B) водних екосистем поліського регіону – від природних вод до істотно змінених та штучних водних об'єктів, які відрізняються умовами існування гідробіонтів, дозволило виявити основні закономірності формування складності структури автотрофної ланки водних екосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Структурно-функціональні характеристики фітопланктону водних екосистем є чутливим індикатором умов існування, що відображає особливості природничо-історичного розвитку та ступінь антропогенного навантаження [2, 3]. Альгофлористичними дослідженнями від середини минулого століття було охоплено багато регіонів світу [4–6]. Однак, накопичені в літературі дані переважно стосуються окремих типів водних екосистем [7–9]. Низкою авторів показано, що зміни, обумовлені надходженням біогенів у континентальні води, створюють умови для розвитку процесу антропогенного евтрофування, який викликає перебудову водних екосистем, зміни їх складності [10–12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Не зважаючи на значну регулярність вивчення окремих водних об'єктів, досі серед дослідників нема єдиної думки щодо механізмів, які впливають на складність структури фітопланктону.

Новизна. Уперше здійснено оцінку складності структури фітопланктону з використанням басейнового підходу, з'ясовано особливості впливу чинників середовища на різноманіття угруповань планктону.

Методологічне або загальнонаукове значення. Вивчення закономірностей формування складності структури фітопланктону у типологічно різних водних об'єктах під впливом природних та антропогенних чинників із використанням басейнового принципу на прикладі Українського Полісся можуть сприяти подальшому розвитку уявлень про зміни різноманіття угруповань гідробіонтів.

Викладення основного матеріалу. Матеріалом для роботи слугували проби, відібрані упродовж 2005–2021 рр. на різнотипних водних об'єктах Українського Полісся. Дослідженнями були охоплені річки Прип'ять, Тетерів, Горинь, Случ, Уж, Уборть, Жолобниця, Корчик, Вілія, Ікопоть, Полква, Синявка, Бересток, Кремно, Деревичка, Гнилоп'ять, Кам'янка Лісова, Путятинка, Лісна, Крошенка, Коднянка, Бобрівка, Зелена, Гуйва; озера карстового походження Лукомське, Воронківське й Острівське; озеро постгляціального походження Дідове і заболочене озеро Горохівка; водосховища: Денишівське, Житомирське (р. Тетерів), Бердичівське

(р. Гнилоп'ять), Новоград-Волинське (р. Случ); а також затоплені кар'єри із видобутку корисних копалин: гранітні (Богунський, Соколовський, Крошенський і Сонячний (м. Житомир), Цегельний (м. Коростень) і Морозівський (м. Корець); силікатні (Селецький і Слобідський (м. Житомир); ільменітовий кар'єр Іршанського гірничо-збагачувального комбінату.

Проби відбирали переважно щомісяця впродовж не менше 3-х вегетаційних сезонів (березень – листопад) і опрацьовували за загальноприйнятими методиками [13]. У цілому було відібрано 2065 альгологічних проб. Оцінку трофічного статусу вод проводили згідно [13].

Паралельно з відбором альгологічних проб вимірювали температуру води ртутним термометром ТБ-3-М1; прозорість – за диском Секкі; кольоровість – за допомогою біхроматно-кобальтової шкали; рН – рН – метром 150М [14]; вміст нітрогену нітратів – за ГОСТ 18826-73 [15], нітрогену амонійного й нітритного – за ГОСТ 4192-82 [16] із подальшим перерахунком у загальний нітроген; фосфору фосфатів – за ДСТУ ISO 6878-2003 [17]. Гідрохімічні й гідрофізичні аналізи проводили посезонно впродовж 2010–2020 рр.

Індекс Шеннона визначали за біомасою фітопланктону, оскільки біомаса є мірою реалізованої у процесі фотосинтезу первинної продукції.

Статистичну обробку отриманих даних проводили за допомогою стандартних методів, реалізованих у пакеті статистичних програм Microsoft Excel та STATISTICA 6.0. У роботі обговорюються лише значимі кореляції ($p < 0,05$). Середні значення показників, які аналізувалися, виражали як середнє значення \pm стандартна похибка ($x \pm SE$). Гідрохімічні параметри досліджуваних водних об'єктів, особливості їх таксономічного складу і кількісних показників фітопланктону наведено авторкою у попередніх її публікаціях [18, 19].

За період досліджень (2005–2021 рр.) у водних об'єктах поліського регіону загалом ідентифіковано 814 видів (879 внутрішньовидових таксонів із номенклатурним типом виду включно), що належать до 15 класів, 43 порядків, 99 родин і 263 родів. Узагальнені дані щодо структури фітопланктону досліджуваних водних екосистем наведено у таблиці 1.

У досліджуваних поліських річках середні значення індексу Шеннона варіювали від 1,07 до 2,94 біт/мг. Значення H_B вказують на переважання полідомінантної структури фітопланктону у річках Тетерів, Горинь, Случ, Кремно, Зелена, Коднянка, Лісна і Жолобниця (2,03–2,94 біт/мг), олігодомінантної – Гнилоп'ять, Уж, Уборть, Корчик, Вілія, Деревичка, Крошенка, Корчик, Полква, Путятинка, Бобрівка і Синявка (1,54–1,92 біт/мг). Найнижчі значення індексу Шеннона спостерігали в річках Гуйва, Бересток та Ікопоть (1,07–1,40 біт/мг). Переважання

Таблиця 1

Показники розвитку фітопланктону різнотипних водних об'єктів Українського Полісся

Показники	Типи водних об'єктів			
	Водотоки	Водосховища	Озера	Кар'єри
Кількість видів	106,8±5,29	118,8±2,82	58,4±2,44	98,7±3,00
Чисельність, млн кл./дм ³	5,58±0,98	9,29±1,45	1,38±0,25	1,79±0,09
Біомаса, мг/дм ³	2,30±5,29	2,88±0,37	1,36±0,15	1,95±0,15
H_B , біт/мг	1,89±0,02	1,76±0,03	1,64±0,05	1,62±0,10

моно- і олігодомінантної структури фітопланктону зазначених водотоків значною мірою обумовлено антропогенним навантаженням на їх екосистеми. Аналіз залежності індексу Шеннона від дії різних чинників середовища показав, що абіотичним параметром, який визначає величину H_B у річках, є вміст загального нітрогену: $r = -0,67$, $p = 0,000001$, $n = 63$. Вплив pH на H_B був прямим ($r = 0,474$, $p = 0,000007$, $n = 63$), а кольоровості вод – зворотнім ($r = -0,248$, $p = 0,00005$, $n = 63$).

Позитивну кореляцію виявлено між середніми значеннями індексу Шеннона і родовими коефіцієнтами фітопланктону водотоків ($r = 0,52$, $p = 0,000002$, $n = 210$). Встановлена залежність вказує на те, що спрощення таксономічної структури фітопланктону супроводжується й зниженням інформаційного різноманіття.

Досліджуваним озерним екосистемам властиве переважання монодомінантної та олігодомінантної структури фітопланктону ($H_B = 0,94 \pm 0,05$ – $1,93 \pm 0,04$ біт/мг), окрім Острівського озера з полідомінантною структурою ($H_B = 3,06 \pm 0,11$ біт/мг). Аналіз зв'язку інформаційного різноманіття з концентрацією біогенів показав помірний вплив вмісту загального нітрогену на H_B : $r = -0,45$, $p = 0,000001$, $n = 30$. Як і у водотоках, фосфор фосфатів не мав достовірного впливу на складність структури водоростевих угруповань ($p = 0,06$). Виявлено тісніший, ніж у поліських річках, зв'язок H_B із pH озерної води ($r = 0,83$, $p < 0,000001$, $n = 30$), із кольоровістю він майже відсутній ($r = -0,05$, $p = 0,01$, $n = 30$). Зміни інформаційного різноманіття не визначалися температурою води ($r = -0,11$, $p = 0,06$, $n = 60$).

У досліджуваних водосховищах відмічали переважання олігодомінантної структури фітопланктону – середні значення індексу H_B в окремих водосховищах варіювали від 1,46 до 1,81 біт/мг. Встановлено, що абіотичним параметром, який визначає величину інформаційного різноманіття у водосховищах був вміст фосфору фосфатів ($r = -0,73$, $p < 0,000001$, $n = 30$), при цьому зв'язок H_B із вмістом загального нітрогену виявився недостатнім ($p = 0,09$). Залежність індексу Шеннона від pH була прямою ($r = 0,63$, $p = 0,000001$, $n = 30$), із кольоровістю води – зворотною ($r = -0,62$, $p = 0,000001$, $n = 30$). Вплив температури води на зміни інформаційного різноманіття виявився слабким ($r = -0,19$, $p = 0,0006$, $n = 150$).

У водоймах, які утворилися на місці затоплених кар'єрів із видобутку корисних копалин, інформа-

ційне різноманіття змінювалося у широких межах: у Соколовському, Іршанському, Богунському, Сонячному, Цегельному та Селецькому кар'єрах H_B рівне $0,98 \pm 0,04$ – $1,94 \pm 0,12$ біт/мг, що відповідає моно- та олігодомінантній структурі фітопланктону; у Морозівському, Крошенському і Слобідському кар'єрах середні значення H_B сягають $2,03 \pm 0,01$ – $2,88 \pm 0,01$ біт/мг (полідомінантна структура). Зростання вмісту загального нітрогену обумовлює зниження H_B у кар'єрах ($r = -0,36$, $p = 0,000007$, $n = 46$, температури води – його зростання ($r = 0,54$, $p = 0,000001$, $n = 270$).

При усередненні величин індексу Шеннона за рангами біомаси було встановлено, що максимальні значення інформаційного різноманіття у водотоках та створених на них водосховищах знаходяться в діапазоні біомаси від 2 до 5 мг/дм³, в озерах і кар'єрах – трохи більше 1 мг/дм³.

Отже, у ряду: річки → водосховища → озера → кар'єри зменшується H_B . Такий самий ряд формують водні об'єкти поліського регіону й за часткою виявлених у них видів-домінантів, а також видів водоростей планктону із високою частотою трапляння (понад 50%) [20], що пояснюється збільшенням монотонності умов існування при переході від лотичних умов до лентичних.

Головні висновки. Аналіз інформаційного різноманіття за індексом Шеннона, розрахованого за біомасою фітопланктону різнотипних водних екосистем Українського Полісся, показав, що найбільшу складність структури угруповань мають річкові екосистеми. Його зниження відбувається в напрямку: річки ($H_B = 1,89 \pm 0,02$ біт/мг) → водосховища ($H_B = 1,76 \pm 0,03$ біт/мг) → озера ($H_B = 1,64 \pm 0,05$ біт/мг) → кар'єри із видобутку корисних копалин ($H_B = 1,62 \pm 0,10$ біт/мг).

Зростання вмісту загального нітрогену, а у водосховищах – фосфору фосфатів обумовлює зменшення інформаційного різноманіття водоростевих угруповань.

Пряма залежність між середніми значеннями індексу Шеннона і родовими коефіцієнтами є підтвердженням того, що спрощення таксономічної структури фітопланктону обумовлює й зниження інформаційного різноманіття.

У штучно створених (кар'єрах) й антропогенно змінених (водосховищах) водних екосистемах зміни інформаційного різноманіття лімітуються температурним чинником ($r = 0,54$ при $n = 270$ і $r = -0,19$ при $n = 150$),

а отже в умовах змін клімату складність їх структури фітопланктону може зазнавати помітних змін.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати дослідження можуть

бути використані для подальшого прогнозування сценаріїв змін угруповань гідробіонтів під дією природних і антропогенних чинників, розробки заходів щодо запобігання деградації водних екосистем.

Література

1. Одум Ю. Экология. Москва : Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
2. Barinova S. S., Klochenko P. D., Belous Y. P. Algae as indicators of the ecological state of water bodies: methods and prospects. *Hydrobiological Journal*. 2015. 51(6). P. 3–21.
3. Deng J., Qin B., Sarvala J., Salmaso N., Zhu G., Ventelä A.-M., Zhang Y., Gao G., Nurminen L., Kirkkala T., Tarvainen M., Vuorio K. Phytoplankton assemblages respond differently to climate warming and eutrophication: a case study from Puhajärvi and Taihu. *Journal of Great Lakes Research*. 2016. 42(2). P. 386–396.
4. Barinova S. Algal diversity dynamics, ecological assessment, and monitoring in the river ecosystems of the eastern Mediterranean, 2011. New York : Nova Science Publishers. 363 p.
5. Omar W. M., Makhloogh A. Water quality of tropical reservoir based on spatio-temporal variation in phytoplankton composition and physico-chemical analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014. 12(7). P. 1735–1472.
6. Xuehual L., Xiaofei L., Lin, W., Zhaoxue T. Diversity in phytoplankton communities: a field test of the intermediate disturbance hypothesis. *Ecological Engineering*. 2019. 129. P. 54–60.
7. Santana L. M., Crossetti L. O., Ferragut C. Ecological status assessment of tropical reservoirs through the assemblage index of phytoplankton functional groups. *Brazilian Journal of Botany*. 2017. 40. P. 695–704.
8. Rodrigues L. C., Pivato B. M., Vieira L. C., Bovo-Scomparin V. M., Bortolini J. C., Pineda A., Train S. Use of phytoplankton functional groups as a model of spatial and temporal patterns in reservoirs: a case study in a reservoir of central Brazil. *Hydrobiologia*. 2018. 805(1). P. 147–161.
9. Cupertino A., Gücke B., Rückert G., Figueredo C. Phytoplankton assemblage composition as an environmental indicator in routine lentic monitoring: taxonomic versus functional groups. *Ecological Indicators*. 2019. 10. P. 522–532.
10. Kozak A., Budzynska A., Dondajewska-Pielka R., Kowalczywska-Madura K., Gołdyn R. Functional groups of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the restored Uzarzewskie Lake. *Water*. 2020. 12. P. 313.
11. Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*. 2002. 24(5). P. 417–428.
12. Polimene L., Brunet C., Butenschön M., Martinez-Vicente V., Widdicombe C., Torres R., Allen, J. Modeling a light-driven phytoplankton succession. *Journal of Plankton Research*. 2014. 36(1). P. 214–229.
13. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В. Д. Романенка. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
14. Лурье Ю. Ю. Унифицированные методы исследования качества вод. Москва : Изд-во СЭВ, 1977. Ч. 3. 91 с.
15. ГОСТ 18826-73. Вода питьевая. Методы определения содержания нитратов. Москва : Изд-во стандартов, 1972. 6 с.
16. ГОСТ 4192-82. Вода питьевая. Метод определения минеральных азотсодержащих веществ. Москва : Изд-во стандартов, 1983. 13 с.
17. ДСТУ ISO 6878:2008. Якість води. Визначення фосфору. Спектрометричний метод із застосуванням амонію молібдату. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 6 с.
18. Шелюк Ю.С. Фітопланктон різнотипних водних екосистем Полісся : автореф. дис. ... доктор. біол. наук. Київ, 2020. 35 с.
19. Shelyuk Yu. S. Formation of energy fluxes in small reservoirs. *Hydrobiological Journal*. 2020. 56(2). P. 17–32.
20. Shelyuk Yu. S. Regularities of primary production formation in river ecosystems (the basins of the Pripyat' and Teterev Rivers, Ukraine). *Hydrobiological Journal*. 2019. 55(4). P. 38–54.