

ЗАГАЛЬНА ГІДРОБІОЛОГІЯ

УДК (574.63:621.311.25)

О.О. ПРОТАСОВ, д. б. н., проф., пров. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: pr1717@ukr.net
ORCID 0000-0002-0204-2007

Т.М. НОВОСЬОЛОВА, мол. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: labtech-hb@ukr.net
ORCID 0000-0002-9594-9846

Ю.Ф. ГРОМОВА, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: yulia.gromova@gmail.com
Гельмгольц-Центр екологічних досліджень,
Брюкштрассе 3а, 39114, Магдебург, Німеччина
e-mail: yuliiia.hromova@ufz.de
ORCID 0000-0003-4684-6864

ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТИНУУМ ТА ДИСКОНТИНУУМ В СИСТЕМІ РІЧКА — ВОДОЙМА-ОХОЛОДЖУВАЧ АЕС

У статті розглядаються деякі особливості структури угруповань фіто- та зоопланктону в системі річка — водойма-охолоджувач. Річка впадає у водойму та є її основним вододжерелом. Структуру планктону даної системи розглянуто з позиції концепції континуума трьох родів: континуума нерозрізненості, градієнтного та метамерного континуумів. Показано дискретно-континуальну структуру планктону водотоку, в якому є кілька лентичних елементів у вигляді ставків, та континуальну структуру планктону в охолоджувачі. Метамерний континуум виявлено для фітопланктону лентичних ділянок річкової системи (ставки та естуарій). Для кількісної оцінки екологічного континуума запропоновано новий показник — індекс континуальності (Ік).

Ключові слова: *фітопланктон, зоопланктон, структура угруповання, індекс континуальності.*

Поняття екологічного континуума входить до числа основних у Водній рамковій директиві ЄС [20]. Підтримання континуальних умов, зокрема біотопічних, як у просторі, так і у часі, є обов'язковою умовою еко-

Ц и т у в а н н я: Протасов О.О., Новосьолова Т.М., Громова Ю.Ф. Екологічний континуум та дисконтинуум в системі річка — водойма-охолоджувач АЕС. *Гідробіол. журн.* 2023. Т. 59. № 6. С. 3—24.

логічного потенціалу, що наближений до максимального [23]. Континуальність та дискретність виступають важливими характеристиками організації угруповань та екосистем, причому ці характеристики мають власне різноманіття [30, 33]. Причини та чинники, що визначають дисконтинуальні умови, не є завжди очевидними, як у випадку фізичного переривання лотичних умов греблями. Різноманіття континуумів є і в даному випадку: при гідравлічному континуумі є дисконтинууми гідрологічний (водотоки і водойми відокремлені) та екологічний (лотичні і лентичні умови суттєво розрізняються). Особливо важливим є підтримка екологічного континуума в антропогенних водоймах, техноекосистемах.

Гідробіологія річок є однією з найбільш розроблених областей континентальноводної гідробіології в цілому [1, 17, 18, 22, 27, 34, 36]. Континуальна організація річкових екосистем добре моделюється в концепції річкового континуума [35], що вже давно обговорювалась в роботах з дослідження структури бентичних [3, 4], рибних угруповань [6]. Одним із важливих чинників впливу людини на річкові системи є їхня фрагментація через створення гребель, що призводить до формування контактуючих між собою ділянок систем як лотичного, так і лентичного типу [21]. Переривання річкового континуума може мати і природний характер [16, 26]. Але недостатньо досліджено ситуації, коли річка межує з техногенною водоймою.

Метою даної роботи було: встановити особливості континуально-дискретної організації планктонних угруповань у системі мала річка — технічна водойма – охолоджувач енергетичної станції.

Матеріал і методика досліджень

Водойма-охолоджувач Хмельницької АЕС (ВО ХАЕС) є штучно створеним водосховищем у заплаві р. Гнилий Ріг, об'ємом близько 120 млн. м³ і площею близько 20 км². Опис ВО та його характеристики наведено в [15]. Річка Гнилий Ріг є притокою р. Вілія і одним із вододжерел ВО (впадає у південну його частину). Довжина річки складає 28 км, площа водозбору — 201 км², який весь знаходиться у 30-кілометровій зоні ХАЕС. Частково, нижче с. Білотин річка штучно спрямлена (каналізована), ширина русла до 5—7 м, глибина в межень становить 0,2—0,5 м, швидкість течії 0,3—0,5 м/с. На річці створено низку ставків в районі сіл Комини, Співаки та Білотин. За рахунок високого рівня води у ВО заплава частково затоплена, утворивши розширення річки в районі контакту з ВО. Між цим розширенням естуарного типу (далі – естуарій) і ВО побудована гребля з прораном, через який стік річки надходить у ВО. Щорічно водойма-охолоджувач акумулює стік р. Гнилий Ріг об'ємом близько 24 млн. м³. Наявність греблі і вузький проран ускладнюють переміщення вод з ВО в нижню частину річки, в естуарій. Річка та розташовані на ній ставки далі у статті будуть розглядатись як система р. Гнилий Ріг.

Дослідження гідробіологічного режиму ВО та всієї техноекосистеми АЕС проводяться вже більше 20 років [13, 15, 28, 32], а на р. Гнилий Ріг [2, 8, 12, 14] з 2015 р. виконуються в контактi з науковцями національного

парку «Мале Полісся». Постійний контроль гідрохімічних показників проводить Еколого-хімічна лабораторія відділу охорони навколишнього середовища ХАЕС.

Дослідження проводили у ранньоосінній період 2021 р. ХАЕС знаходилась в режимі роботи двох енергоблоків. Проби фіто- та зоопланктону відбирали у пелагічній частині ВО по всій акваторії (рис. 1), у р. Гнилий Ріг — на руслових ділянках (на тальвезі). В естуарії на станціях ближче до греблі (ст. 39, 40) і на ділянці контакту річки та естуарію (ст. 87), а також у ставках — в пелагічній частині на чистоводді (рис. 2). Проби фітопланктону на всіх станціях відбирали з поверхневого горизонту. Проби зоопланктону у ВО — здійснюючи вертикальні тотальні лови з глибини 3 м до поверхні, у р. Гнилий Ріг разом з естуарієм — з поверхневого шару, фільтруючи 50 дм³ води через планктонну сітку (газ № 70). Опрацьовували матеріал за загальноприйнятими в гідробіології методиками [5]. Назви та систематичну приналежність таксонів фітопланктона надано згідно [24]. Домінуючим вважали вид або НІТ (нижчий ідентифікований таксон), коли його показник складав не менше 50 % від загальних показників рясності (чисельність, біомаса). У випадку, якщо частка найбільш рясного виду була менше 50 %, до домінуючих відносили види, сумарна частка яких складала не менше 50 % від загального показника.

Подібність таксономічного складу оцінювали за коефіцієнтами Серенсена та Смірнова [10]. Різноманіття визначено за індексом Шеннона [10]. Кластерний аналіз проводили за методом Брея-Кертіса [19, 29]. При розрахунках середніх значень вказано стандартне відхилення [11]. Паралельно з відбором проб проводили заміри температури, електропровідності, рН та прозорості води за диском Секкі. Також відібрано проби для визначення гідрохімічних показників. Обробка гідрохімічних проб виконана Еколого-хімічною сертифікованою лабораторією ХАЕС за стандартними методами.

Результати досліджень

Термічні умови у всій дослідженій системі значно відрізнялися. В охолоджувачі температура була від 23,6 до 28,2 °С. У західному, просторово найбільш віддаленому від скиду підігрітих вод районі було відмічено мінімальну температуру, максимальну — на виході з відвідного каналу. В річці температура зростала від верхів'я (12,2 °С) до естуарію (18,2 °С). На лотичних ділянках температура завжди була нижчою, ніж на сусідніх лентичних.

Показники прозорості води за диском Секкі у ВО були досить близькими у всіх районах — від 0,9 до 1,1 м. У ставках на річці прозорість становила близько 1 м, на ділянках річки — до дна (глибина близько 0,3—0,5 м).

Електропровідність води у всій системі значно змінювалась. В охолоджувачі можна було виділити дві зони. До першої входили західний, центральний райони, західна частина північного. Тут середній показник становив 690±7 мкСім/см. У східній частині, включаючи і південний рай-

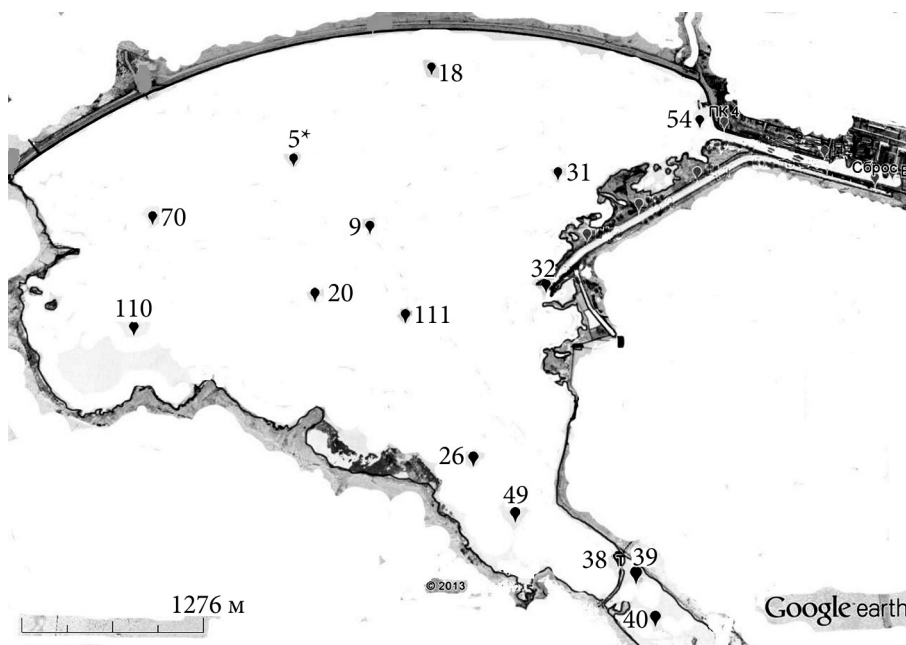


Рис. 1. Схема станцій досліджень водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

он, електропровідність була дещо нижчою — 670 ± 25 мкСім/см. Це, ймовірно, пов'язано з впливом стоку р. Гнилий Ріг, де показник був 340 мкСім/см, а також завдяки підкачуванню додаткової води у східній частині північного району з кар'єру, який пов'язаний з р. Горинь, де показник був 390 мкСім/см. Хоча різниця між показниками електропровідності по ділянках ВО не була великою, слід відмітити саме тенденцію зниження, тому що весь водний масив у ВО піддається значному впливу техногенної циркуляції та перемішування.

Розподіл показників рН по акваторії ВО був рівномірний (8,56—8,50). Досить високі значення ($8,67 \pm 0,06$), очевидно, пов'язані з процесами первинного продукування. У р. Гнилий Ріг значення рН були ближче до нейтральних та поступово збільшувались від верхів'я до естуарію (7,10—7,85).

Рівень значень показників мінерального азоту був нижчим у ВО, ніж у річці. Суттєвої залежності показників від локалізації станцій ВО не виявлено. Дуже низька концентрація нітратів у ВО ($0,087 \pm 0,011$ мг N/дм³) пов'язана з масовим розвитком фітопланктону. Показники амонійного азоту у верхів'ї р. Гнилий Ріг ($0,45$ мг N/дм³) та на ділянці біля с. Комини ($0,54$ мг N/дм³) були у 2 рази вищими, ніж у ВО ($0,23 \pm 0,04$ мг N/дм³). Вниз за течією вони поступово знижувались і на ділянці в районі гідрометеопосту вже були на такому самому рівні, що і у ВО. В той же час розподіл нітратів вздовж течії мав інші особливості: максимальні показники було зареєстровано на ділянці гідрометеопосту ($0,601$ мг N/дм³), на інших

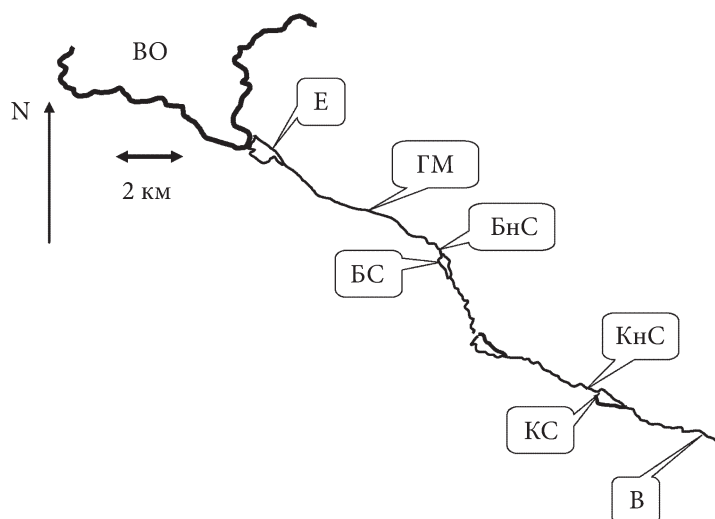


Рис. 2. Схема станцій досліджень р. Гнилий Ріг: В — верхів'я річки (ст. 33); КС — с. Кодини, ставок; КнС — с. Кодини, річка нижче ставка; БС — с. Білотин, ставок; БнС — с. Білотин, річка нижче ставка; ГМ — гідрометеопост; Е — естуарій (ст. 39, 40, 87), вересень 2021 р.

досліджених станціях їхні значення були в декілька разів меншими ($0,171 \pm 0,045$ мг N/дм³). Таким чином, річка є чинником поповнення водойми-охолоджувача сполуками азоту.

Концентрація фосфору фосфатів у ВО досягала $0,263 \pm 0,006$ мг P/дм³. Розподіл показників по акваторії був рівномірним. Незначне підвищення (до $0,277$ мг P/дм³) в районі виходу відвідного каналу (ст. 32), ймовірно, викликане впливом скиду води з очисних споруд, які є основним зовнішнім джерелом фосфатів для ВО [7]. На всіх ділянках річки концентрація фосфору фосфатів у воді була на порядок нижчою, ніж у ВО ($0,020 \pm 0,003$ мг P/дм³).

Таксономічне багатство *фітопланктону* ВО у 2021 р. складало 80 НІТ і було у межах значень попередніх років [15, 32]. По відділах: Euglenophyta та Ochrophyta налічували по одному НІТ, Charophyta, Miozoa, Cryptophyta — по два НІТ, Cyanobacteria — чотири, Bacillariophyta — 18, Chlorophyta — 50 НІТ.

Фітопланктон р. Гнилий Ріг налічував 55 НІТ з 8 відділів (Miozoa, Euglenophyta — по одному НІТ, Cryptophyta та Charophyta — по два, Cyanobacteria та Ochrophyta — по чотири, Chlorophyta та Bacillariophyta — по 21 НІТ). Багатство фітопланктону по акваторії ВО на окремих станціях було в межах 19—32 НІТ при тому, що мінімальні та максимальні показники відмічено на сусідніх станціях: на виході з відвідного каналу (ст. 32) та на ст. 31. У фітопланктоні р. Гнилий Ріг коливання значень багатства між станціями було більшим (6—29 НІТ на окремих станціях), а питоме

багатство (середня кількість НІТ на одну пробу) було нижчим, ніж у ВО (відповідно $13,1 \pm 8,5$ та $24,8 \pm 3,8$ НІТ в пробі). Мінімальні показники зареєстровано у верхів'ї та на ділянці річки в районі великої конгрегації перлівниць на відстані близько 100 м від греблі в с. Білотін, де вода піддається істотній біофільтрації [14], максимальні — у естуарії, тут багатство було на тому самому рівні, що й у ВО. Таксономічна структура фітопланктону на всій акваторії ВО характеризувалась значним переважанням Chlorophyta у флористичному спектрі, на другому місці були представники Bacillariophyta. Подібну структуру мав фітопланктон естуарію та ставка біля с. Комини. На інших ділянках річки найбільша кількість НІТ була у Bacillariophyta. Представники Ochrophyta відмічені лише у фітопланктоні річки, натомість водорості відділу Charophyta — лише на деяких станціях у ВО (рис. 3).

Оцінка таксономічної подібності фітопланктону. Подібність складу фітопланктону за коефіцієнтом Серенсена у ВО була досить високою ($0,62 \pm 0,07$ по всій матриці подібності). Подібність фітопланктону річкової системи була низькою ($0,21 \pm 0,14$). Виключення становила ситуація, що склалася на станціях КС та КнС (ставок та річка нижче ставка біля с. Комини), подібність фітопланктону тут досягала 0,60. Станції розташовано близько одна від одної та на станції нижче ставка, вірогідно, ще сильно відчувався вплив ставка. В той же час на станціях БС та БнС (ставок та нижче ставка біля с. Білотин) значення подібності складу фітопланктону було нижчим за значущі величини (0,44). Кластерний аналіз за методом Брея-Кертиса наочно показує картину подібності складу фітопланктону (рис. 4).

Аналіз таксономічної подібності складу фітопланктону за індексом Смірнова показав, що найбільшими значеннями оригінальності (більше 100) характеризувався фітопланктон на ділянках річки. Головним чинником, що впливав на оригінальність фітопланктону на більшості станцій у даній виборці, була наявність рідкісних (з малою частотою трапляння) видів у складі. У фітопланктоні естуарію відмічено шість оригінальних видів, що зустрічались лише на цій станції, на станції Комини ставок — чотири оригінальних види. Станції, де у складі фітопланктону було хоча б три рідкісні види, мали високу оригінальність за Смірновим. Виключення становила ст. 38, де високий рівень оригінальності визначався не наявністю рідкісних видів, а відсутністю банальних. Більшість станцій ВО мали низьку оригінальність.

Частота трапляння. Розподіл НІТ фітопланктону за частотою трапляння мав особливості як у різних водних об'єктах, так і в усій системі. Кількість НІТ з частотою трапляння нижче 50 % у фітопланктоні ВО складала 72,2 %, р. Гнилий Ріг — 94,5 %, системи річка — ВО — 83,8 %. Відповідно, різний вигляд на графіках (рис. 5) мають лінії тренда: для всієї системи в цілому лінія тренда помірно крута та по всій своїй довжині має увігнуту форму; для ВО — крута увігнута, у верхній частині випукла; для річки лінія тренда полого і увігнута.

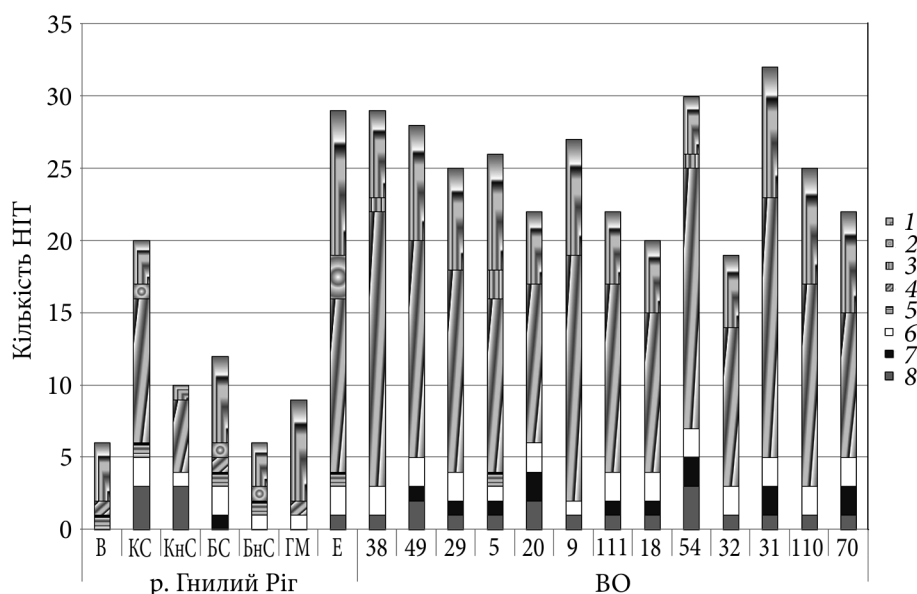


Рис. 3. Багатство НІТ фітопланктону по відділах р. Гнилий Ріг та водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.: 1 — Bacillariophyta; 2 — Ochrophyta; 3 — Charophyta; 4 — Chlorophyta; 5 — Euglenophyta; 6 — Cryptophyta; 7 — Dinophyta; 8 — Cyanobacteria. Тут і на рис. 4, 6, 9, 10, 12 — розташування та позначки станцій див. на рис. 1 і 2.

З усього складу НІТ не було жодного таксона, який би зустрічався на всіх станціях системи. Окремо у ВО, з більш гомогенними біотопічними умовами, зареєстровано сім видів із стовідсотковою частотою трапляння. Серед них *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen по всій акваторії за чисельністю та біомасою регулярно входила до складу домінантних комплексів та на більшості станцій була монодомінантом за біомасою.

Розподіл фітопланктону по станціям системи р. Гнилий Ріг був гетерогенним. Лише один вид *Rhodomonas pusilla* (Bachmann) Javornický був відмічений на шести з семи вивчених станцій (частота трапляння 86 %), *Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg — на п'яти станціях (частота трапляння 71 %), *A. granulata* — на чотирьох (57 %). На деяких станціях ці види за чисельністю або біомасою входили до складу домінантних, але ніколи не досягали ступеня монодомінування. Всі інші НІТ фітопланктону річки мали частоту трапляння менше 50 %.

Показники рясності фітопланктону. Чисельність фітопланктону річки складала $8,81 \pm 17,11$ млн. кл/дм³, її розподіл за профілем був закономірно нерівномірним (рис. 6, а), коефіцієнт варіації (CV) дорівнював $194,2 \pm 17,8$ %. В той же час у ВО середні показники чисельності були вищими ($15,78 \pm 3,88$ млн кл/дм³) та їхній розподіл по акваторії був досить гомогенним (CV = $24,6 \pm 4,6$ %).

Біомаса фітопланктону річки була нижчою, ніж у ВО (відповідно $1,33 \pm 1,35$ та $17,57 \pm 7,38$ мг/дм³). Розподіл біомаси відбувався за тими са-

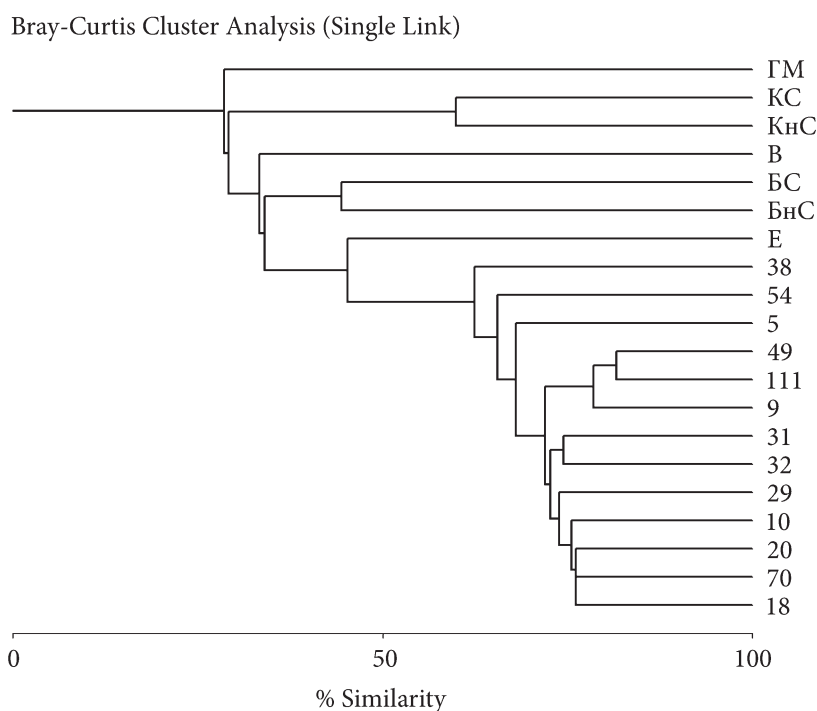


Рис. 4. Подібність складу НІТ фітопланктону в системі р. Гнилий Ріг та у водоймі-охолоджувачі Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

ними закономірностями, що ї чисельності (рис. 6, б): у річці CV біомаси = $101,8 \pm 15,5$ %, у ВО CV біомаси = $42,0 \pm 7,1$ %.

Ценотична структура фітопланктону. Важливою характеристикою для виділення угруповань фітопланктону є розподіл домінантів за біомасою. У ВО основу біомаси по всій акваторії формувала *A. granulata* (від 37,1 до 78,6 %), до якої на деяких станціях приєднувався *Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin (від 11,1 до 28,6 %). В той же час, домінантні комплекси у фітопланктоні системи річки налічували 10 НІТ, і їхні списки по станціях розрізнялися. Структура домінування на різних станціях системи річки змінювалась від моно- (0,86 біт/мг за індексом Шеннона) до полідомінантної (3, 58 біт/мг). На станціях з лентичними умовами (естуарій та два ставки) домінантні комплекси були досить подібними і за складом та структурою об'єднувались в один кластер (рис. 7).

Характер розподілу біомаси фітопланктону в угрупованнях на різних ділянках річки та у ВО мав особливості. На ділянках з лентичними умовами структура домінування була більш вирівненою, ніж на лотичних ділянках річки.

На підставі аналізу подібності складу (див. рис. 4), розподілу показників рясності (див. рис. 6), а також характеру домінування (див. рис. 7) були виділені угруповання фітопланктону у системі річка Гнилий Ріг — ВО (табл. 1).

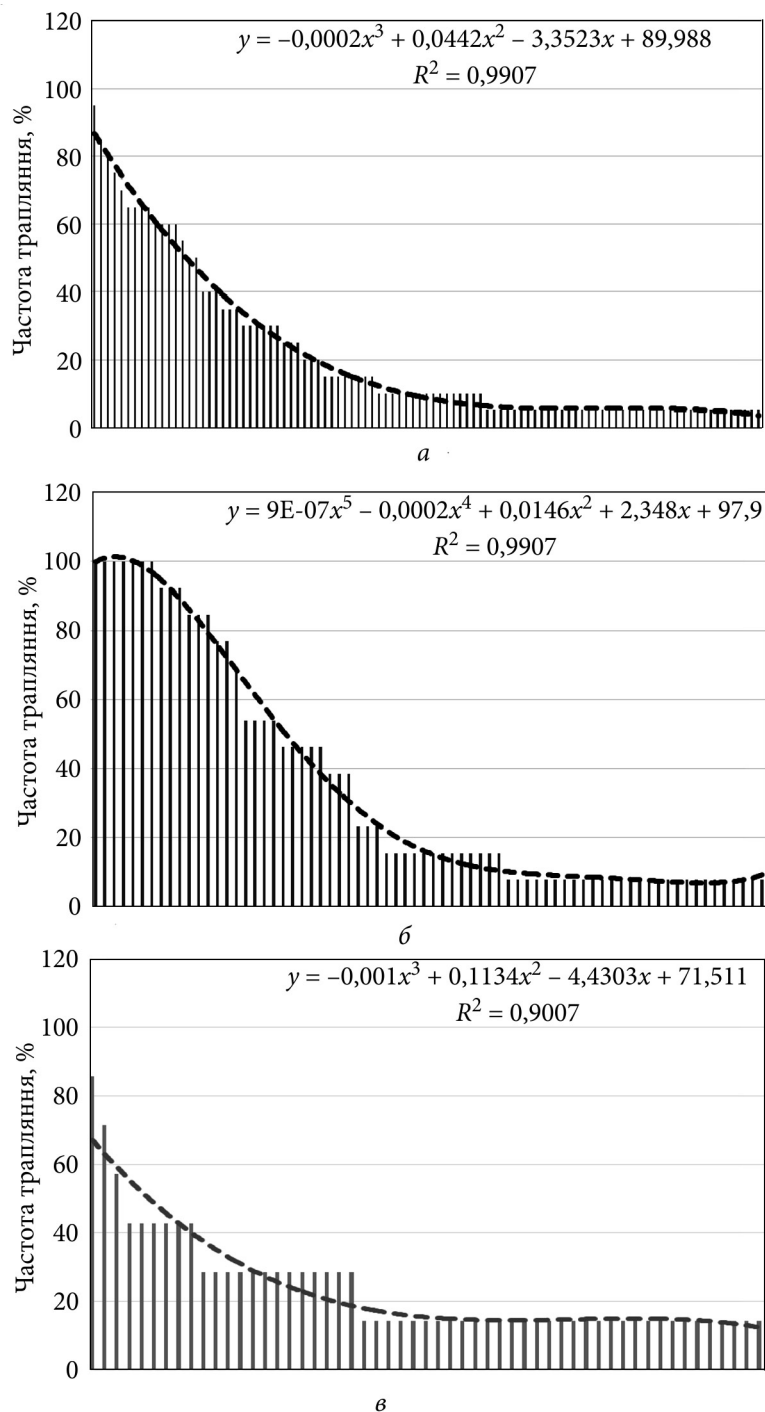


Рис. 5. Розподіл НІТ фітопланктону за частотою трапляння: *а* — для всієї системи; *б* — для ВО; *в* — для р. Гнилий Ріг. * На осі *x* представлено ранговий розподіл НІТ за частотою трапляння

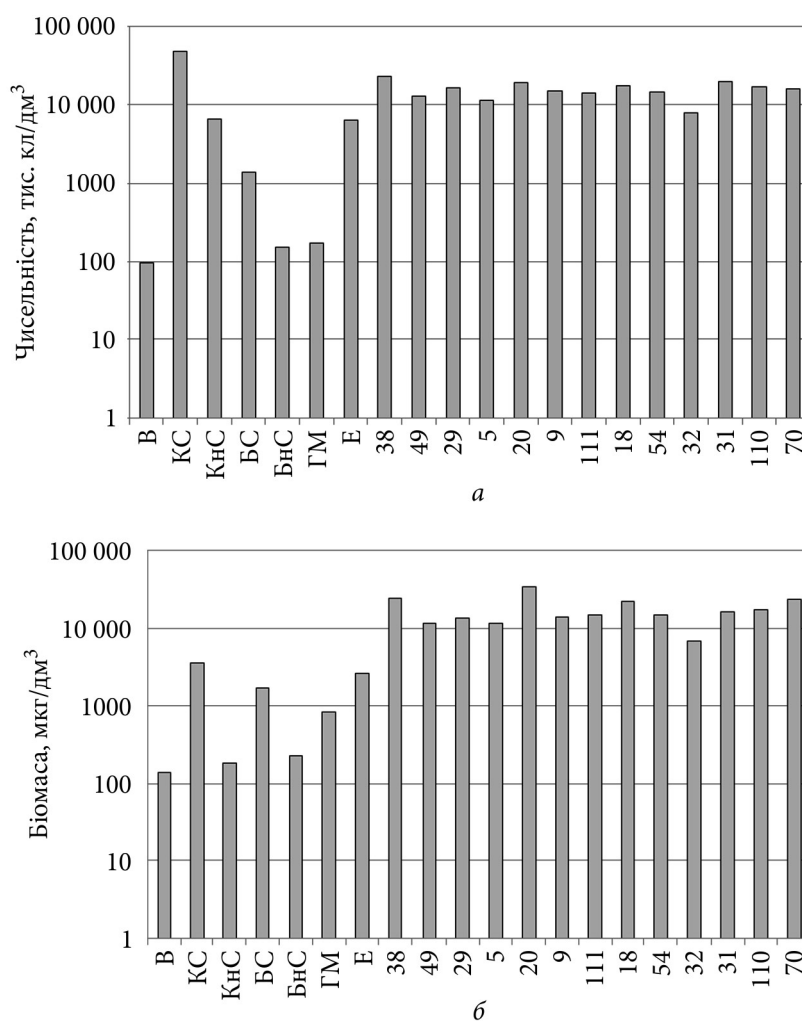


Рис. 6. Чисельність (а) і біомаса (б) фітопланктону р. Гнилий Ріг та водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

Біотопічне різноманіття р. Гнилий Ріг обумовило формування декількох угруповань фітопланктону вздовж течії річки. На кожній окремій ділянці, що характеризувалася лотичними умовами, виділялося окреме оригінальне угруповання. Спільними їхніми рисами було низьке багатство НІТ та кількісних показників на більшості ділянок, порівняно із такими характеристиками фітопланктону ВО, ставків та естуарія. Угруповання, як видно з їхніх назв (див. табл. 1), різнилися за складом домінантів, в деяких випадках навіть на рівні відділів, також мали різну структуру домінування. В той же час, на лентичних ділянках річкової системи (естуарій та ставки), незважаючи на їхню віддаленість одна від одної в просторі, формувалися однойменні та близькі за своїми характеристиками угруповання. Вони визначалися вищим рівнем розвитку та вираженою

Таблиця 1
Характеристики угруповань фітопланктону на ділянках р. Гнилий Ріг і водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

Ділянки водних об'єктів*	Угруповання (назва за домінантами в біомасі)	Кількість НІТ	Н/Н, біт/екз	Н/В, біт/мг	J/N	J/V	Чисельність, млн. кл/дм ³	Біомаса, мг/дм ³
р. Гнилий Ріг								
Верхів'я	<i>Nitzschia linearis</i> + <i>Trachelomonas volvocina</i>	6	2,52	1,90	0,98	0,74	0,098	0,14
Комини, ставок	<i>Cryptomonas</i> sp. + <i>Trachelomonas volvocina</i> + <i>Fragilaria tenera</i>	20	2,47	3,28	0,57	0,76	47,07	3,57
Комини, нижче ставка	<i>Mucidosphaerium pulchellum</i>	10	2,14	1,82	0,64	0,55	6,54	0,18
Білогин, ставок	<i>Cryptomonas</i> sp. + <i>Aulacoseira granulata</i>	12	3,15	3,58	0,88	0,72	1,40	1,75
Білогин, нижче ставка	<i>Placopeis elginensis</i>	6	2,42	1,72	0,94	0,67	0,15	0,22
Гідрометеопост	<i>Melosira varians</i>	9	2,75	0,86	0,87	0,27	0,17	0,84
Естуарій	<i>Cryptomonas</i> sp. + <i>Dinobryon divergens</i> + <i>Rhodomonas pusilla</i>	29	3,66	3,51	0,75	0,72	6,23	2,58
Водойми-охолоджувач								
Ст. 38, 49, 29, 5, 20, 9, 111, 18, 54, 32, 31, 110, 70	<i>Aulacoseira granulata</i>	74	3,99	2,29	0,65	0,37	15,78	17,57

Примітка. * Тут і в табл. 2: розташування та позначки станцій див. на рис. 1 і 2; Н/Н — різноманітність за чисельністю, Н/В — різноманітність за біомасою.

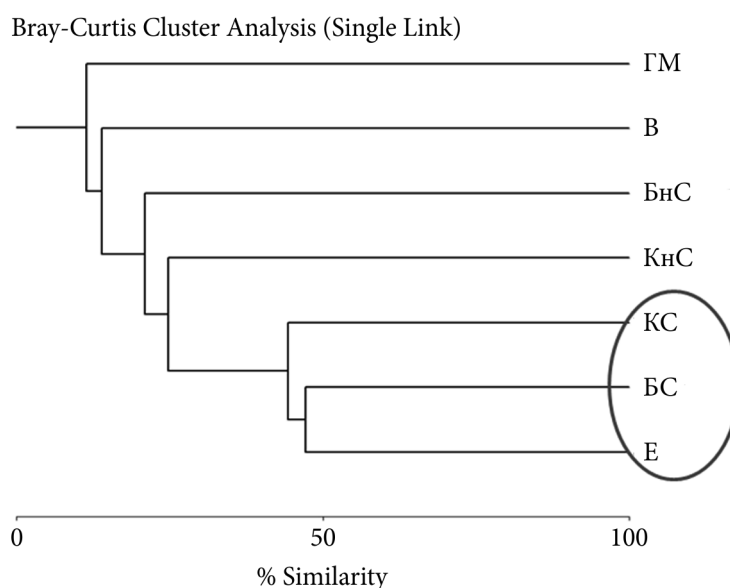


Рис. 7. Подібність фітопланктону за складом та структурою домінуючих за біомасою комплексів р. Гнилий Ріг

полідомінантною структурою. Фактично ці угруповання можна вважати модифікаціями угруповання *Cryptomonas* sp.

Мінімальні розбіжності у складі, кількісних показниках та структурі фітопланктону між окремими станціями ВО свідчать про його континуальний розподіл і дають можливість говорити про формування єдиного угруповання на всій акваторії. Це угруповання характеризувалось високим рівнем багатства (середня кількість НІТ в пробі — $24,8 \pm 3,8$) та рясності. Слід зазначити, що високе багатство НІТ цього загального угруповання частково пов'язане із великою кількістю досліджених станцій, що об'єднані в ньому.

Зоопланктон. Рівень таксономічного багатства зоопланктону р. Гнилий Ріг та ВО був у межах значень попередніх років [2, 25, 31, 32]. Кількість таксонів зоопланктону у р. Гнилий Ріг (53 НІТ, включаючи 27 Rotifera, 17 Cladocera, 9 Copepoda) була вищою, ніж у ВО (33 НІТ, у тому числі 14 Rotifera, 11 Cladocera, 7 Copepoda та велігери *Dreissena*). Таксономічне багатство зоопланктону в контактній зоні цих водних об'єктів — в естуарії річки та південному районі ВО також помітно відрізнялось. Кількість НІТ в естуарії становила 36, що було схожим з таким у річці вище (37 НІТ). У південному районі ВО, куди впадає річка (станції 29, 49, 38—49¹, 38), виявлено 29 із 33 НІТ на решті акваторії ВО. Кількість НІТ зоопланктону в річці, у тому числі в межах естуарію, змінювалась в більш широкому діапазоні, ніж у ВО. Найменше НІТ-багатство в межах річки

¹ Станція 38-49 розташована між ст. 38 та 49.

виявлено в естуарії при впадінні у ВО (12 НІТ) та у верхів'ї (13 НІТ), найбільше — на ділянці русла нижче ставка біля с. Кодини (27 НІТ). Кількість НІТ зоопланкtonу на станціях ВО змінювалась у межах 21—27, з найбільшими значеннями у східному (ст. 31) та південному районах (ст. 38) (рис. 8).

Оцінка таксономічної подібності. Порівняння складу зоопланкtonу в системі річка — ВО показало низьку подібність: значення індексу Серенсена змінювались у межах 0,15—0,47. Подібність складу зоопланкtonу в межах річки була також невисокою — 0,21—0,58, за винятком зоопланкtonу ставка та ділянки русла, розташованої безпосередньо нижче ставка біля с. Кодини (0,73 за індексом Серенсена). Склад зоопланкtonу ВО був досить одноманітним по всій акваторії — значення індексу Серенсена були високі, змінюючись в межах 0,80—0,98. Кластерний аналіз за методом Брея-Кертиса наочно демонструє однорідність складу зоопланкtonу у ВО та відносну різноманітність на ділянках річки (рис. 9). Дендрограма не показує значної подібності між станціями естуарію (87, 39, 40) та південного району ВО (38, 38—49, 49, 29), куди річка впадає, незважаючи на існування гідравлічного зв'язку між ними. Це вказує на швидку трансформацію зоопланкtonу, який надходить з річки, до умов ВО.

Аналіз значень оригінальності видового складу зоопланкtonу в системі річка — ВО за індексом Смірнова показав, що своєрідним складом зоопланкtonу (значення оригінальності вище 100) характеризувались всі ділянки річки, за виключенням найближчої до ВО ст. 39. Своєрідності складу зоопланкtonу річки надавали зокрема види *Brachionus diversicornis* (Dad.), *Brachionus leydigii* Cohn, *Conochilus unicornis* Rouss., *Euchlanis deflexa* (Gosse), *Mytilina mucronata* (Müll.), *Testudinella patina* (Herm.), що

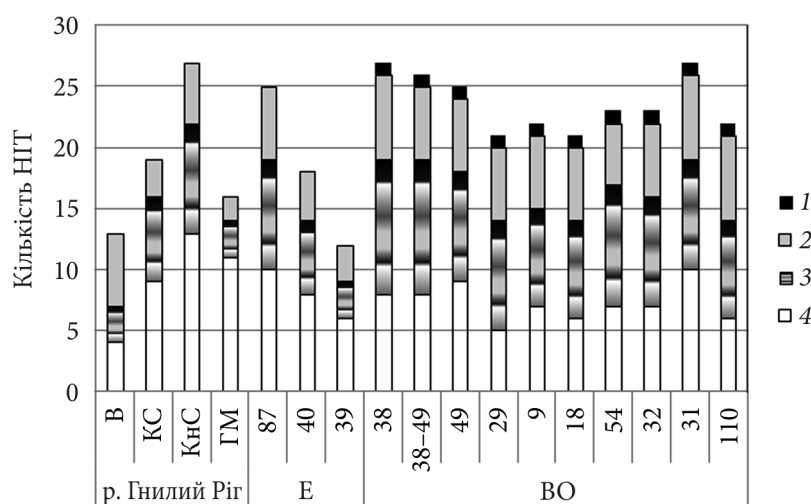


Рис. 8. Багатство НІТ зоопланкtonу р. Гнилий Ріг та водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р. 1 — *Veliger Dreissena*; 2 — Copepoda; 3 — Cladocera; 4 — Rotifera

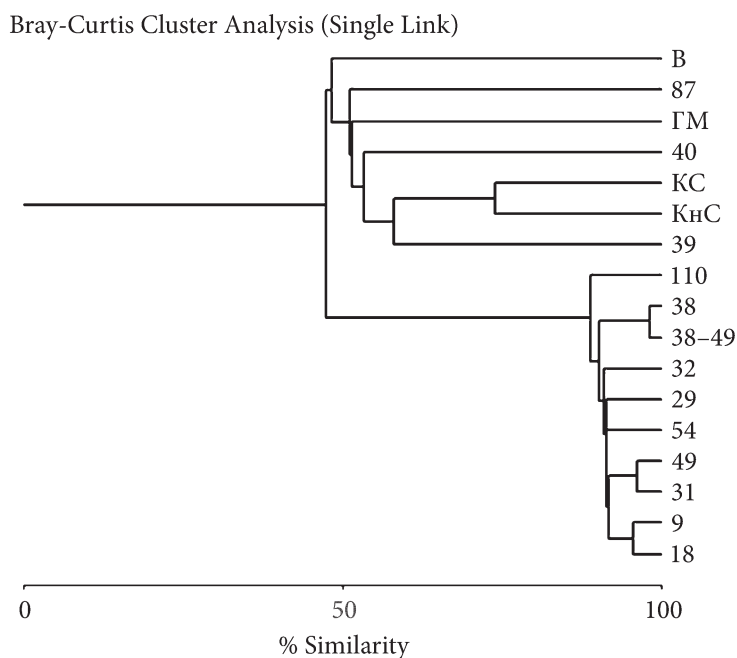


Рис. 9. Подібність станцій за складом НІТ зоопланктону р. Гнилий Ріг та водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

зустрічалися лише на окремих станціях. Найбільша кількість рідкісних НІТ для системи річка — ВО була на ст. 87 та нижче ставка біля с. Комини. Обидві станції розташовані на перехідних ділянках річки: перша — при переході річки в естуарій, друга — на ділянці виходу зі ставка.

Розподіл НІТ зоопланктону за частотою трапляння показує принципово різну картину в усій системі, в річці та ВО (рис. 10). Для системи річка — ВО і для річки окремо ранговий розподіл НІТ за частотою трапляння має увігнуту обгинальну криву, тоді як для ВО — опуклу. Це пов'язано з тим, що у ВО лише 30 % всіх НІТ мали частоту трапляння нижче 50 %, тоді як у річці — 76 %, у всій системі — 74 %. Причиною такого розподілу є біотопічна континуальність у ВО та дискретність — у річці та у всій системі. Серед НІТ з високою частотою трапляння (вище 50 %), кількість яких у ВО була більш ніж у два рази вищою, ніж у річці, лише три зустрічались в обох водоймах, причому на всіх станціях: *Bosmina longirostris* (O.F. Müll.), *Cyclopoidea* juv., *Nauplii* Copepoda.

Показники рясності. Чисельність зоопланктону в пелагіалі ВО змінювалась від середніх до високих значень за градацією [9], з мінімумом 367,6 тис. екз/м³ біля виходу з відповідного каналу (ст. 32) та максимумом 1223,6 тис. екз/м³ біля входу в підвідний канал (ст. 54). Досить великі значення чисельності спостерігались у північному та південному районах ВО. Біомаса зоопланктону характеризувалась величинами від нижчих за середні до вищих за середні. Найменші значення біомаси спостерігались у

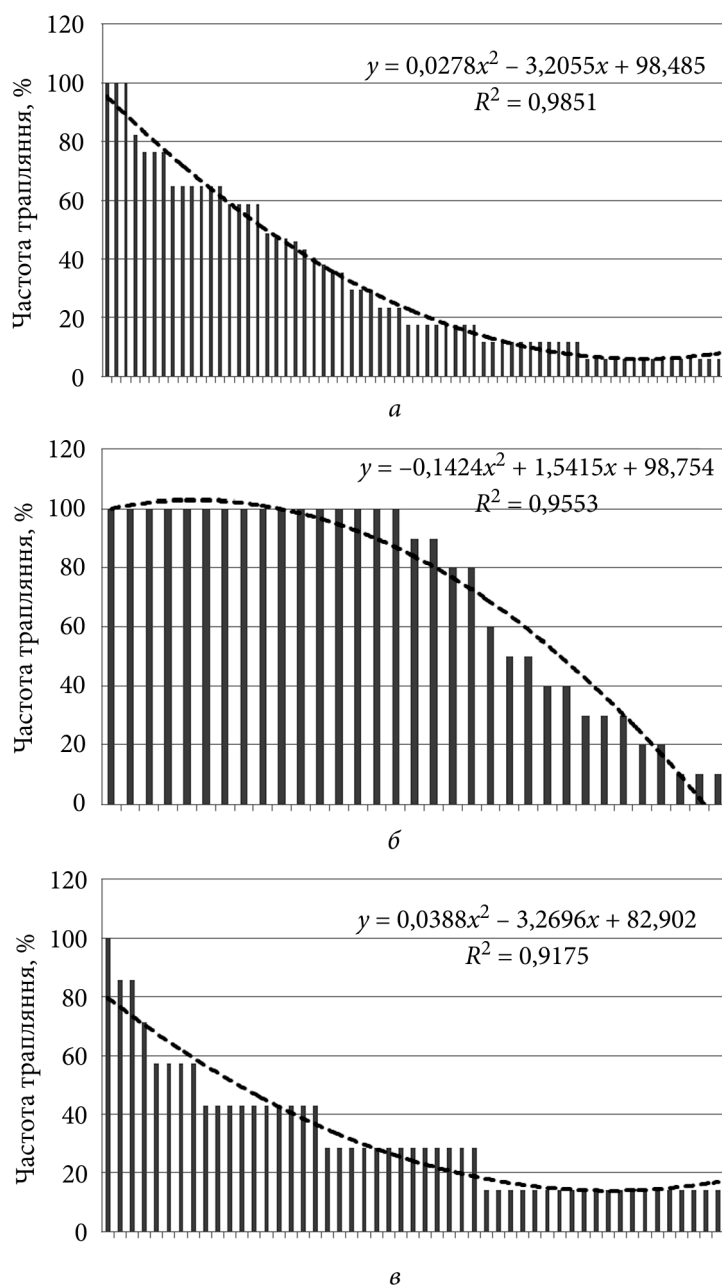


Рис. 10. Розподіл НІТ зоопланктону за частотою трапляння: *а* — для всієї системи; *б* — для ВО; *в* — для р. Гнилий Ріг. * На осі *x* представлено ранговий розподіл НІТ за частотою трапляння

районі виходу з відповідного каналу (4,2 г/м³), найбільші — в північному районі та ділянці південного району з боку естуарія р. Гнилий Ріг (10,1—10,6 г/м³) (рис. 11).

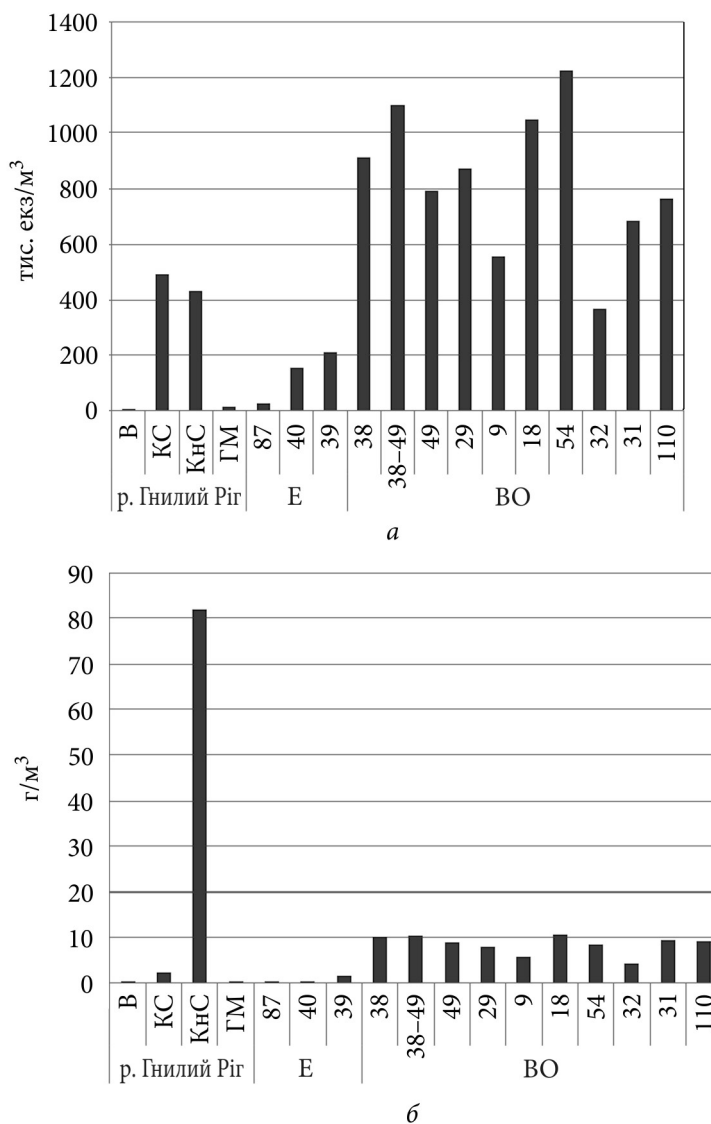


Рис. 11. Чисельність (а) і біомаса (б) зоопланктону р. Гнилий Ріг та водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

Кількісний розвиток та структура зоопланктону різних ділянок річки суттєво відрізнялись. Чисельність змінювалась від дуже низьких величин (5,1 тис. екз/м³) до середніх (431,0 тис. екз/м³), біомаса — від гранично низьких (0,04 г/м³) до гранично високих (82,0 г/м³). Найнижчі значення чисельності і біомаси зоопланктону відмічені у верхів'ї річки, найбільш високі — на ділянці русла нижче ставка (див. рис. 11).

Що стосується однорідності розподілу показників чисельності, то за середнього значення чисельності для всієї системи $568\,925,6 \pm 398\,769,2$ екз/м³ значення CV становили $70,1 \pm 8,5$ %. Для ВО при середній

чисельності $833,8 \pm 257,7$ тис. екз/м³ значення CV становили $30,9 \pm 6,3$ %. Для всієї річки за середньої чисельності $190,5 \pm 190,6$ тис. екз/м³ значення CV становили $105,5 \pm 15,7$ %. Це свідчить про найбільшу гетерогенність розподілу показників чисельності у річці, якщо взяти до уваги наявність лотичних і лентичних біотопів.

При середньому значенні біомаси для всієї системи $10,2 \pm 18,9$ г/м³ значення CV становили $186,4 \pm 11,4$ %. Розподіл біомаси зоопланктону в межах ВО був більш однорідним. При середній біомасі для ВО $8,5 \pm 2,1$ г/м³ значення CV становили $24,1 \pm 5,1$ %. Для всієї річки за середньої біомаси $12,3 \pm 30,7$ г/м³ значення CV становили $248,5 \pm 18,2$ %. Найбільша гетерогенність розподілу показників рясності (біомаси) була у річці.

Ценотична структура зоопланктону. Аналіз складу та показників рясності, характеру та ступеня домінування дозволяють виділити кілька угруповань зоопланктону в досліджених водних об'єктах (табл. 2). На кожній ділянці р. Гнилий Ріг формувалось характерне угруповання зоопланктону. В естуарії виділялось три різних угруповання, які змінювали одне одного вздовж продольного профілю, їхні кількісні показники збільшувались у напрямку до греблі ВО. Таксономічна структура угруповань річки була різноманітна. Коловертки домінували у ставку біля с. Комини ($52,8$ % чисельності та $59,8$ % біомаси), переважно завдяки розвитку *Brachionus angularis* Gosse та *Asplanchna priodonta* Gosse. Гіллястовусі ракоподібні складала більшість на руслових ділянках, досягаючи $87,7$ % чисельності та $99,6$ % біомаси нижче ставка біля с. Комини, переважно завдяки масовому розвитку *Simocephalus vetulus* (O.F. Müll.). На ділянці русла в районі гідрометеопосту домінувала *B. longirostris*, у верхів'ї річки — *Ceriodaphnia quadrangula* (O.F. Müll.) (за біомасою), а при вході в естуарій (ст. 87) значну частку в біомасі складала *Sida crystallina* (O.F. Müll.). Веслоногі ракоподібні (переважно особини ювенільних стадій) були найбільш численними у верхів'ї та естуарії, де вони також переважали за біомасою. В той же час безпосередньо у ВО формувалось єдине угруповання зоопланктону, в якому переважно домінували гіллястовусі ракоподібні ($21,9$ — $70,5$ % чисельності і $49,3$ — $84,1$ % біомаси). За біомасою домінували *Chydorus sphaericus* (O.F. Müll.), *Daphnia galeata* (Sars), *B. longirostris* та *Cyclopoidea* juv. У складі угруповання спостерігались велігери дрейссени, частка яких була незначною.

Оцінка континуальності за індексом Ік. Оцінка екологічного континууму в системі річка — ВО та в окремих водних об'єктах є складним завданням. Якісно вже було відзначено існування як біотопічного дисконтинууму, з одного боку, так і континууму у просторовому розподілі окремих НІТ, показників рясності, а також ценотичних едностей, угруповань. Для кількісної оцінки екологічної континуальності ми пропонуємо спеціальний показник — індекс континуальності (Ік). Він може бути розрахований за такою формулою:

$$I_k = 1/(B_c + CV_N + CV_B) \cdot b,$$

Таблиця 2
Характеристика угруповань зоопланктону на ділянках р. Гнилий Ріг і водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС, вересень 2021 р.

Ділянки водних об'єктів	Угруповання (назва за домінантами в біомасі)	Кількість НІТ	Н/Н, біт/екз	Н/В, біт/мг	Чисельність, тис. екз/м ³	Біомаса, г/м ³	Деструкція, Дж/м ³ ·за годину
р. Гнилий Ріг							
Верхів'я	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>	13	1,47	2,07	5,06	0,04	0,71
Ставок, с. Комини	<i>Asplanchna priodonta</i>	19	2,38	2,33	491,60	2,34	50,81
Нижче ставка, с. Комини	<i>Simoscephalus vetulus</i>	27	2,17	0,67	430,97	81,99	889,56
Гідрометеопост	<i>Bosmina longirostris</i>	16	1,03	0,35	13,88	0,14	2,70
Ст. 87	<i>Sida crystallina</i> , <i>Nauplii</i> , <i>Cyclopoidea juv.</i>	25	2,23	3,19	25,24	0,14	3,09
Ст. 40	<i>Nauplii</i> , <i>Cyclopoidea juv.</i>	18	1,582	2,02	156,72	0,37	18,28
Ст. 39	<i>Nauplii</i>	12	1,68	0,76	210,60	1,49	59,23
Водойма-охолоджувач							
Ст. 38, 38—49, 49, 29, 9, 18, 54, 32, 31, 110	<i>Chydorus sphaericus</i> , <i>Daphnia galeata</i>	33	3,180	3,027	833,81	8,51	404,86

де: V_s — відсоток (%) видів (НІТ), частота трапляння яких менше 50 %; CV_N — коефіцієнт варіації показників чисельності (%); CV_B — коефіцієнт варіації показників біомаси (%); b — коефіцієнт для конвертації отриманого значення у цілі величини, ми прийняли його рівним 10 000.

Розрахунки показали, що для зоопланктону річки значення I_k склали 23,3, для ВО — 117,2, а для всієї системи річка — ВО — 30,2. Очевидно, що ми маємо справу з певною різноманітністю показників континуальності. Раніше нами було запропоновано [33] розрізнити два роди екологічного континууму: континуум першого роду, або континуум нерозрізненості, який практично і спостерігався в нашому випадку у ВО — значення I_k тут були максимальними. Континуум другого роду — континуум градієнтний, з певними застереженнями може бути представлений річковою системою р. Гнилий Ріг, хоча тут є лотичні і лентичні ділянки, які «шикуються» в певний градієнт ценотичних угруповань, що змінюють одне одного. Як видно зі значення I_k , континуальність тут набагато, майже в 6 разів, нижча, ніж у ВО. Дійсно, гідравлічно всі водні об'єкти пов'язані між собою, а в деяких ділянках очевидний поступальний зв'язок (система ділянок та біотопів річки). Континуальність усієї системи в 4 рази менша, ніж континуальність у ВО. Цілком можливо, що тут доцільно говорити про фрактальну ієрархічну систему, як у біотопічному, так і в ценотичному сенсі.

Слід зазначити, що оцінки континуальності по фітопланктону призводять до тих самих висновків. Значення показника I_k для річки склали 25,6, для ВО — 72,0, для всієї системи — 40,5. Виявилось, що фітопланктон у ВО у 1,6 раза менш континуальний, ніж зоопланктон, тоді як для річки ці показники практично збігаються.

Обговорення результатів досліджень

Розглянута система річка — ВО, на перший погляд, є прикладом досить добре біотопічно відокремлених водних об'єктів. Однак при найближчому розгляді слід звернути увагу на ряд моментів, що ускладнюють картину. У першу чергу відзначимо, що мають місце, так би мовити, «односторонні дисконтинуальні умови». Оскільки всі об'єкти пов'язані гідравлічно течією річки, а у водоймі-охолоджувачі існують інтенсивні циркуляційні потоки, дисконтинуальність має певні обмеження. Усю систему (на цьому рівні аналізу) цілком можна і треба розглядати як єдину. Але присутність гребель і ставків на річці слід розглядати як розриви гідрологічного континууму. В таких умовах можна припустити, що планктон лотичних ділянок системи, як і лентичних (ВО, з урахуванням розмірів, своєрідного термічного режиму, навряд чи можна порівняти зі ставками), може мати подібний склад і показники рясності, подібні ценотичні угруповання. Нарешті, в біотичній континуальності повинен враховуватись просторово-часовий фактор: при перенесенні водних мас з однієї ділянки до іншої, при зміні біотопів для угруповань планктону необхідним є деякий час, щоб відбулись перебудови в структурі ценозів, тому,

при досить видимих межах різних ділянок системи, біоценотична структура може мати певні риси континуальності.

Вище було вказано на існування континуальності всієї системи, при цьому слід звернути увагу на ценотичну структуру планктону, в першу чергу фітопланктону. У двох ставках та естуарії, в лентичних умовах, формуються різні варіанти одного угруповання (*Cryptomonas* sp. + ...), що характеризуються найбільшим НІТ-багатством, високою біомасою та полідомінантною структурою. Тобто йдеться про послідовне повторювання ценотично подібних структур. Формується своєрідний континуум, який можна назвати *метамерним* (подібно до метамерної структури артропод), або континуумом третього роду. Континуум же всієї системи може бути названий *метаконтинуумом*, тим що об'єднує різні типи континуумів. Крім того, метаконтинуум, напевно, має риси системності, саме фрактальної системи, не тільки континуумів різного роду, але й континуумів різного масштабу.

Висновки

Головним чинником, що визначав континуальність, або дискретність у розподілі планктону в системі річка — ВО, були біотопічні особливості досліджених водойм та водотоків. Розподіл зоо- та фітопланктону по акваторії водойми-охолоджувача носив континуальний характер. Але, в певних умовах, взаємодія техногенних факторів циркуляції та вітрових течій може порушувати континуальність між водними масами та ценотичну континуальність [15]. Відсутність поступовості у змінах біотопів вздовж профілю річки, переривання логічних ділянок лентичними обумовили дисконтинуальний характер розподілу планктону. Однак на ділянках з лентичними умовами (естуарій та ставки), незважаючи на їхню віддаленість у просторі (просторовий розрив континууму), формувались однойменні та близькі за своїми характеристиками угруповання фітопланктону. Ценотична структура зоопланктону в системі річка — ВО також показує існування двох варіантів континуальності: для ВО спостерігається континуум зоопланктону по всій водоймі, для річки ценотична континуальність суттєво порушена.

Запропонований спеціальний показник — індекс континуальності (Ік) дозволив дати кількісну оцінку екологічної континуальності для системи в цілому та для різних її складових.

Список використаної літератури

1. Богатов В.В., Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток : Дальнаука, 2017. 384 с.
2. Громова Ю.Ф. Зоопланктон трансформованої малої річки прип'ятського Полісся. VIII з'їзд Гідроекол. тов-ва України : тез. доп. (6—8 лист. 2019 р., Київ). Київ, 2019. С. 24—27.
3. Жадин В.И. Фауна рек и водохранилищ. *Тр. ЗИН АН СССР*. 1940. Т. V, вып. 3—4). 992 с.
4. Жадин В.И. Донная фауна Волги от Свяги до Жигулей и ее возможные изменения. Сб. работ по проблеме реконструкции фауны Волги. *Тр. ЗИН АН СССР*. 1948. Т. 8, вып. 3. С. 413—466.

5. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод ; за ред. В.Д. Романенка. Київ : Логос, 2006. 408 с.
6. Никольский Г.В. Экология рыб. Москва : Высш. шк., 1974. 367 с.
7. Новоселова Т.Н., Голод А.В., Левицкий А.В., Протасов А.А. Контроль экологического состояния водоема-охладителя АЭС на основании данных по прозрачности воды. *Ядерная энергетика та докiлля*. 2018. Т. 11, № 1. С. 57—61.
8. Новосолова Т.М. Фітопланктон малої річки в умовах техногенного ветланду. Матеріали наук. конф. «Стан і біорізноманіття екосистеми Шацького національного природного парку» (12—15 вер. 2013 р., Шацьк). Львів : СПОЛОМ, 2013 С. 60—62.
9. Окснюк О.П., Жданова Г.А., Гусынская С.Л., Головки Т.В. Оценка состояния водных объектов Украины по гидробиологическим показателям. 1. Планктон. *Гидробиол. журн.* 1994. Т. 30, № 3. С. 26—31.
10. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. Москва : Наука, 1982. 287 с.
11. Плохинский Н.А. Биометрия. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 368 с.
12. Протасов А.А., Силаева А.А., Новоселова Т.Н., Игнатенко И.И. Техно-ветланды: особенности структуры, использования и изучения: Екологія водно-болотних угідь та торфовищ (зб. наук. статей). Київ : НВП «Інтерсервіс», 2014. С. 198—202.
13. Протасов А.А., Синицына О.О., Калиниченко Р.А. и др. Планктон, бентос и перифитон водоема-охладителя Хмельницкой АЭС. *Гидробиол. журн.* 2000. Т. 36, № 1. С. 14—29.
14. Силаева А.А., Протасов А.А., Новоселова Т.Н., Громова Ю.Ф. Влияние фильтрационной активности Unionidae на планктонную подсистему малой реки. *Наук. Вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Біологія*. 2016. Вип. 41. С. 44—47.
15. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / Под ред. А.А. Протасова. Киев, 2011. 234 с.
16. Экосистема малой реки в изменяющихся условиях среды / Под ред. А.В. Крылова, А.А. Боброва. Москва : Тов-во науч. изд. КМК, 2007. 372 с.
17. Allan J.D. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. London : Chapman & Hall, 1995. 388 p.
18. Arscott D., Tockner K., Nat D., Ward J. Aquatic habitat dynamics along a braided alpine river ecosystem (Tagliamento river, Northern Italy). *Ecosystems*. 2002. Vol. 5. P. 802—814.
19. Bray-Curtis dissimilarity [https://en.wikipedia.org/wiki/Bray %E2 %80 %93Curtis_dissimilarity](https://en.wikipedia.org/wiki/Bray%E2%80%93Curtis_dissimilarity) (дата звернення 20.05.2023).
20. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj> (дата звернення 20.05.2023).
21. Dubrovsky Y. Features of quasi-natural ecosystems and their role in the Conservation of Biodiversity. *Ecology and Evolutionary Biology*. 2018. Vol. 3, N 4. P. 27—32.
22. Giller P.S. Malmqvist B. The biology of streams and rivers. Oxford : Oxford University Press, 1998. 296 p.
23. Guidance Document N 37 Steps for defining and assessing ecological potential for improving comparability of Heavily Modified Water Bodies Document endorsed by EU Water Directors at their meeting in Helsinki on 26 November 2019. CIS working group ECOSTAT 2020. URL: <https://circabc.europa.eu/sd/a/d1d6c347-b528-4819-aa10-6819e6b80876/Guidance> (дата звернення 23.12.2020).
24. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication. National University of Ireland. Galway. 2019. Режим доступу: [<http://www.algaebase.org>].
25. Guleykova L.V., Protasov A.A. Zooplankton of the cooling pond of the Khmelnytsky nuclear power station under conditions of intensive technogenous load and dreissena introduction. *Hydrobiol. J.* 2009. Vol. 45, N 3. P. 16—32.
26. Häggglund Å., Sjöberg G. Effects of beaver dams on the fish fauna of forest streams. *Forest Ecology and Management*. 1999. Vol. 115, Is. 2—3, P. 259—266.
27. Lampert W., Sommer U. Ekologia wod sredladowych. Warszawa : Wyd. Naukowe PWN, 2001. 415 s.

28. Novoselova T.N., Protasov A.A. Phytoplankton of cooling ponds of techno-ecosystems of nuclear and thermal power stations (a review). *Hydrobiol. J.* 2015. Vol. 51, N 3. P. 37—52.
29. Pielou E.C. The Interpretation of Ecological Data: A Primer on Classification and Ordination ISBN: 978-0-471-88950-2 September 1984. 288 p.
30. Protasov A.A. River and lake continua: an attempt at analysis and synthesis. *Inland Water Biology.* 2008. Vol. 1, N 2. P. 105—113.
31. Protasov A.A., Guleykova L.V. Zooplankton diversity in the cooling pond of the Khmelnytskyi NPS. *Hydrobiol. J.* 2011. Vol. 47, N 3. P. 30—38.
32. Protasov A.A., Sylaieva A.A., Novoselova T.N. et al. Nuclear power plant technoe-cosystem: 18 years of hydrobiological observations. *J. Siber. Fed. Univ. Biology.* 2017. Vol. 10, N 4. P. 459—484.
33. Protasov A.A., Uzunov Y.I., Sylaieva A.A. et al. Ecological continuum: fundamental concepts and use in applied hydrobiology. *Hydrobiol. J.* 2022. Vol. 58, N 5. P. 3—15.
34. Transboundary Dniester River basin: ecological state, reference conditions, management / Ed. by Afanasyev S., Manturova O. Kyiv, 2021. 384 pp.
35. Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W. The River continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37, N 1. P. 130—137.
36. Ward J.V., Bretschko G., Brunke M. et al. The boundaries of river systems: the metazoan perspective. *Freshw. Biol.* 1998. Vol. 40. P. 531—569.

Надійшла 19.06.2023

O.O. Protasov, Dr. Sci. (Biol.), Prof., Leading Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
ORCID 0000-0002-0204-2007

T.M. Novosolova, Junior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
ORCID 0000-0002-9594-9846

Yu.F. Hromova, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: yulia.gromova@gmail.com
Helmholtz-Centre for Environmental Research — UFZ,
Brückstraße 3a, 39114 Magdeburg, Germany
e-mail: yuliiia.hromova@ufz.de
ORCID 0000-0003-4684-6864

ECOLOGICAL CONTINUUM AND DISCONTINUUM IN THE RIVER — NPP COOLING POND SYSTEM

Some features of the structure of phytoplankton and zooplankton communities in the system of cooling pond and the river that flows into the cooling pond and is its main water source were discussed in the article. The plankton structure of this system was considered from the standpoint of the continuum concept of three types: continuum of indistinguishability, gradient and metamerism. The discrete-continuous structure of the plankton of the watercourse, which has several lentic elements in the form of ponds and the continuous structure of plankton in the cooler was shown. A metamerism was revealed for phytoplankton of lentic areas of the river system (ponds and estuaries). For the quantitative assessment of the ecological continuum, a new indicator is proposed — the continuity index (Ic).

Key words: phytoplankton, zooplankton, community structure, continuity index.