

УДК (574.34) [574.52 (574.583:584.587)] (556.115)

Є.В. СТАРОСИЛА, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: jenua_star@ukr.net
ORCID 0000-0001-5366-7894

В.І. ЮРИШИНЕЦЬ, д. б. н., голов. наук. співроб., проф.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: ciliator@ukr.net
ORCID 0000-0001-6310-7874

БАКТЕРІОПЛАНКТОН ТА БАКТЕРІОБЕНТОС ЯК ІНДИКАТОРИ ЕКОЛОГО-САНІТАРНОГО СТАНУ ВОДОЙМ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ ВОДОКОРИСТУВАННЯ¹

Бактеріопланктон та бактеріобентос середньої та пригреблевої ділянок Київського водосховища, верхньої ділянки Канівського водосховища р. Дніпро, досліджений в липні 2021 р. в умовах аномально високих температур води та повітря, характеризувався високими показниками кількісного розвитку та локальними відмінностями. Середні показники чисельності бактеріопланктону були подібними (Київське водосховище — $14,4 \pm 6,2$ млн. кл/см³, Канівське водосховище — $17,6 \pm 1,4$ млн. кл/см³), при більшому діапазоні варіювання в Київському водосховищі. Чисельність бактеріобентосу була значно вищою на верхній ділянці Канівського водосховища ($26,5 \pm 6,2$ млрд. кл/г), ніж у Київському водосховищі ($8,8 \pm 5,6$ млрд. кл/г), при подібному діапазоні варіювання. Істотні відмінності виявлено у чисельності різних еколого-трофічних груп бактерій: евтрофні та оліготрофні бактерії у воді та донних відкладах були більш численними у Канівському водосховищі порівняно з Київським. Їхнє співвідношення (ЕБ/ОБ) було <1 у Київському водосховищі та >1 — у Канівському. Це опосередковано свідчить про переважання легкодоступної органічної речовини на верхній ділянці Канівського водосховища в умовах точкових забруднень річкової ділянки, яка знаходиться в межах великого міста (м. Київ). Встановлено достовірну пряму позитивну залежність ($p < 0,01$) між чисельністю евтрофних бактерій у планктоні та бентосі і вмістом органічної речовини (за ПО). Згідно з екологічною класифікацією якості поверхневих вод, за показником чисельності планктонних евтрофних бактерій середня ділянка Київського водосховища відносилась до категорій вод «дуже добрі» — «задовільні», II, III класів якості, пригреблева ділянка — «погані» — «дуже погані», IV та V класів якості. Досліджені ділянки Канівського водосховища відповідали категорії вод «дуже погані», V класу якості. Вміст потенційно патоген-

¹ Роботу виконано за рахунок бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень (КПКВК 6541230)».

Ц и т у в а н н я: Старосила Є.В., Юришинець В.І. Бактеріопланктон та бактеріобентос як індикатори еколого-санітарного стану водойм та безпечності водокористування. Гідробіол. журн. 2023. Т. 59. № 4. С. 65—80.

них мікроорганізмів був найвищим у пригреблевій ділянці Київського водосховища (основні складові — *Escherichia coli* і колиформні бактерії, та бактерії р. *Staphylococcus*) та у затоці Оболонь Канівського водосховища (бактерії р. *Enterococcus*).

Ключові слова: бактеріопланктон, бактеріобентос, санітарно-показові мікроорганізми, біологічна індикація, водосховища.

Провідне біогеохімічне значення бактерій у прісноводних екосистемах полягає у визначальній ролі цих мікроорганізмів у регенерації та мобілізації біогенних елементів у харчових мережах, участі водних бактерій у перетвореннях більшості біологічно активних речовин у цих системах [24]. Ключова позиція бактерій не просто впливає з їхньої ролі у деградації та мінералізації органічних речовин до неорганічних складових, але є результатом продукування ними біомаси та трофічного зв'язку з еукаріотними хижаками, адже бактерії є важливим компонентом кормової бази різноманітних груп безхребетних тварин [17, 18, 21, 28]. Ще одна важлива роль водних бактерій полягає у тому, що серед них є цілий ряд видів, які здатні викликати захворювання гідробіонтів, навколоводних тварин та людини [7, 30].

У зв'язку з провідною роллю бактерій в гідроекосистемах та здатністю прокаріот швидко реагувати на зміни провідних абіотичних і біотичних чинників, антропогенне забруднення, пропонується використовувати різні кількісні та якісні показники бактеріопланктону та бактеріобентосу як індикаторні для встановлення еколого-санітарного стану водних об'єктів різного типу [27]. Показники чисельності потенційно патогенних та патогенних мікроорганізмів свідчать про загрозу безпечності комплексного водокористування і унормовані національним та міжнародним законодавством (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text>, <http://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/sanpin-4630-88.pdf>, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32006L0007>) [6, 16, 19, 30].

Сучасна р. Дніпро на значному протязі своєї течії є каскадом водосховищ, які були утворені в різний час та є сильно трансформованими водним об'єктами, що взаємодіють між собою і характеризуються різним ступенем проточності, рівневим режимом, водообміном. Створення водосховищ змінило ландшафт долини річки, а регулювання ними водного стоку змінило природний гідрологічний та гідрохімічний режим Дніпра [1, 10, 14, 29].

Після всебічних досліджень на етапі формування та становлення екосистем, з 2010-х років мікробіологічні дослідження водосховищ мали фрагментарний характер [2, 4, 5, 9, 12, 15].

Беручи до уваги визначальну роль Дніпра та його водосховищ у забезпеченні потреб України у прісній воді, розуміння провідної біотичної ролі мікроорганізмів у формуванні якості води та умов існування гідробіонтів, дослідження сучасного стану угруповань водних бактерій в умовах зарегульованого стоку та комплексного водокористування є необхідним та актуальним.

Метою роботи стало встановлення кількісних та якісних характеристик утруповань бактеріопланктону і бактеріобентосу деяких ділянок Київського та Канівського водосховищ р. Дніпро, виявлення особливостей динаміки індикаторних показників, які характеризують водні об'єкти, у взаємозв'язку з еколого-санітарними умовами та локальними особливостями.

Матеріал і методика досліджень

Наведено результати дослідження, проведеного у липні 2021 р. на середній та пригреблевій ділянках Київського водосховища, верхній ділянці Канівського водосховища, його заток, що розташовані в межах м. Києва.

У межах Київської та Чернігівської областей України знаходиться верхнє за розташуванням у каскаді та утворене греблею Київської ГЕС Київське водосховище. Окрім Дніпра у водосховище впадають річки Прип'ять, Тетерів, Ірпінь [1, 14]. Відзначається вагома роль поверхневого стоку у формуванні його гідрохімічного режиму, а саме: розподіл притоку води з верхнього Дніпра, Прип'яті і, у меншому ступені, Тетерева має переважно природний характер [9, 12].

Матеріалом досліджень були відібрані з поверхневих шарів проби води та донних відкладів на ділянках біля: с. Страхолісся (прикордонний пункт), с. Сухолуччя (урочище Акація), сіл Глібівка і Козаровичі (рис. 1). Температура води у період досліджень коливалась у межах 27,8—29,9 °С, вміст органічної речовини за перманганатною окиснюваністю (ПО) — 16,5—17,8 мг О/дм³.

У межах Київської і Черкаської областей України розташовано друге за течією на Дніпрі та наймолодше у каскаді водосховищ, що створені на ньому, — Канівське водосховище. Найбільшою притокою Дніпра, що впадає у Канівське водосховище, є р. Десна, значно менші річки: ліва притока — Трубіж та права — Стугна [1, 12]. Гідрохімічний режим верхньої ділянки обумовлюється стоком Київського водосховища та р. Десни, також вагоме значення антропогенного чинника через внесення стічних вод промислових і комунальних підприємств м. Києва [12].

Матеріалом досліджень слугували відібрані з поверхневих шарів проби води та донних відкладів на ділянках заток Собаче Гирло і Оболонь (правий берег), русловій ділянці нижче Північного мосту (лівий берег) (див. рис. 1). Температура води у період досліджень становила 28,9—30,1 °С, вміст органічної речовини за ПО — 18,0—20,1 мг О/дм³.

Донні відклади на досліджених ділянках різнились: на ділянках Київського водосховища вони були представлені чорними мулами, у затоках Собаче Гирло та Оболонь верхньої частини Канівського водосховища — відповідно чорними мулами та чорними мулами з рештками молюсків, на русловій ділянці — піском.

Водні об'єкти характеризуються різним гідрологічним режимом, гідроморфологією та характером берегової лінії, наявністю населених пунктів, фізико-хімічними параметрами води та донних відкладів та зазнають

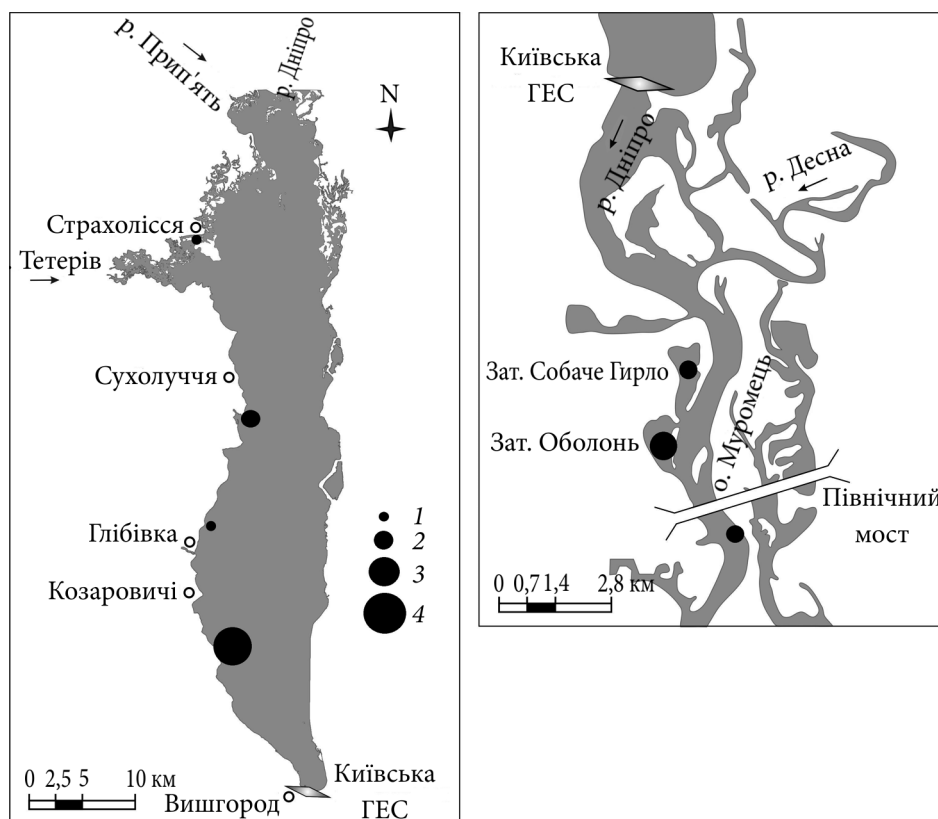


Рис. 1. Карта-схема регіону досліджень зі станціями відбору проб та розподіл санітарно-показових бактерій: 1 — від 1 до 2; 2 — від 15 до 30; 3 — від 40 до 50; 4 — від 180 до 200 тис. КУО/100 см³

різнофакторного антропогенного тиску, включно з точковим і дифузним забрудненням та рекреаційним навантаженням [2, 9, 12].

Для вивчення структурних параметрів угруповання бактерій та метаболічної активності клітин (цілісності цитоплазматичної мембрани) готували препарати на чорних полікарбонатних мембранних фільтрах Millipore з діаметром пор 0,22 мкм. Чисельність бактеріопланктону (ЧБП), бактеріобентосу (ЧББ) та клітин з ушкодженою цитоплазматичною мембраною визначали методом прямого підрахунку, фарбуючи препарати відповідно флуорохромами DAPI і пропідіум йодид [23]. Дослідження проводили з використанням епіфлуоресцентного мікроскопа Axio Imager A1 фірми Zeise (об'єктив x100, окуляр x10) на базі центру колективного користування приладами Інституту гідробіології НАН України.

Кількість евтрофних (сапротрофних, ЕБ) та оліготрофних бактерій (ОБ) у воді і донних відкладах визначали шляхом культивування проб відповідно на рибо-пептонному агарі та голодному агарі, що містить 25 мг/м³ живильного агару Діфко [8].

Для досліджень санітарно-бактеріологічного забруднення води по-сіви відібраного матеріалу здійснювали на набори підложок сухого живильного середовища Dry Filter™ (фірми Himedia). В їхню основу покладено використання хромогенних субстратів задля швидкої ідентифікації характерних бактеріальних ензимів за рахунок відповідного забарвлення колоній. Проби води фільтрували через стерильні білі мембранні фільтри Millipore з діаметром пор 0,45 мкм. Інкубували чашки Петрі зі зразками в умовах, вказаних у технічній документації до наборів (<https://www.himedialabs.com/intl/en/products/Microbiology/Ready-prepared-Media-DriFilter%E2%84%A2-Membrane-Nutrient-Pad-Media/100000179>). Інтерпретацію результатів здійснювали шляхом прямого підрахунку кількості колоній утворюючих одиниць у перерахунку на об'єм профільтрованої проби (КУО/100 см³).

Для виявлення, виділення та підрахунку у досліджуваній воді санітарно-показових мікроорганізмів використовували: для кишкової палички та інших коліформних бактерій — агар М-Ендо (набір MF 010); для деяких Гр-позитивних та Гр-негативних бактерій — універсальне хромогенне середовище (набір MF 018); для сальмонел — хромогенне середовище (набір MF 020); для бактерій, що ферментують лактозу в кишківнику — середовище з типолем (набір MF 015); для кишкових ентерококів — жовчно-ескуліновий агар з азидом натрію та середовище Сланець—Бартлі (набори MF 004 та 022); для стафілококів — середовище Чапмена—Стоуна (набір MF 008); для псевдомонад — середовище з цетримідом (набір MF 007).

Для отримання уявлення про трофічну структуру мікробоценозу вивчали співвідношення між кількістю бактерій, що ростуть на поживних середовищах з різною концентрацією та якісним складом органічної речовини (ЕБ/ОБ). Також для оцінки еколого-санітарного стану визначали відсоткову частку евтрофних бактерій у воді та донних відкладах у загальній чисельності бактеріопланктону та бактеріобентосу, відповідно (ЕБ/ЧБП і ЕБ/ЧББ). Для характеристики фекального забруднення води визначали колі-індекс (вміст *Escherichia coli* у перерахунку на 1 дм³) [8, 13, 20, 25].

Санітарний стан досліджених ділянок водосховища був охарактеризований на основі використання кількісних показників вмісту у воді санітарно-показових мікроорганізмів за категорією водокористування — місця для купання, спорту та відпочинку населення, а також водойми в межі населених пунктів, що регламентовані у Державних санітарних правилах і нормах (СанПіН № 4630-88, МОЗ України № 173 від 19.06.1996) (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text>, <http://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/sanpin-4630-88.pdf>) та відповідно до Директиви 2006/7/ЕС щодо якості води для купання від 15.02.2006 р. (Directive 2006/7/EC of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC) (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32006L0007>).

Статистичну обробку та візуалізацію даних виконано із застосуванням табличного процесору MS Excel 2016 та пакету програм PAST 4.03 (Paleontological Statistics Software system) [22].

Результати досліджень та їх обговорення

Київське водосховище. Бактеріопланктон. Чисельність бактеріопланктону у водосховищі коливалась у межах від 10,8 до 23,8 млн. кл/см³ (в середньому $14,5 \pm 6,2$) (рис. 2, а). На 75 % досліджених ділянок величини ЧБП були подібними і становили в середньому $11,3 \pm 0,7$ млн. кл/см³, окрім ділянки біля с. Сухолуччя, очевидно через вплив вод р. Тетерів. Підвищену чисельність бактеріопланктону у Тетерівській затоці спостерігали і раніше [2, 9]. Чисельність бактерій з ушкодженою цитоплазматичною мембраною (мертві мікроорганізми) у воді ділянок Київського водосховища становила 0,9—1,5 млн. кл/см³, що складало від 6,4 до 11,6 % (в середньому $8,9 \pm 2,2$ %) чисельності бактеріопланктону (див. рис. 2, а). Подібно ЧБП, винятком була ділянка водосховища біля с. Сухолуччя, де функціонування мікроорганізмів регулював вплив вод р. Тетерів.

Кількість евтрофних бактерій у воді досліджених ділянок варіювала від 2,4 до 115,6 тис. кл/см³ (рис. 3, а). Кількість оліготрофних бактерій становила від 4,2 до 71,6 тис. кл/см³. Відмічено тенденцію до збільшення кількості ЕБ та ОБ від середньої до пригреблевої ділянок водосховища.

Відомо, що у водоймах зі зростанням вмісту доступної органічної речовини чисельність евтрофних бактерій може різко збільшуватись, що є непрямим показником забруднення та евтрофування природних вод. Збільшення кількості оліготрофних бактерій у воді опосередковано свідчить про зростання вмісту біохімічно стійких органічних сполук, зокрема і внаслідок поступової мінералізації речовин фітогенного походження [3, 4, 9, 15, 21, 25, 26].

Доля евтрофних бактерій у складі бактеріопланктону коливалась у межах 0,02—1,04 % (в середньому 0,41 %). За умовною класифікацією [9, 13] такі величини співвідношення ЕБ/ЧБП характеризують стан води середньої ділянки водосховища як «чиста», пригреблевої — «брудна».

Відношення ЕБ/ОБ, яке опосередковано визначається якістю органічної речовини та характеризує трофність водойм [3, 8, 25, 26], у водосховищі змінювалось від 0,2 до 1,6 (в середньому 0,8) (рис. 4). Більшість досліджених ділянок водосховища характеризувались переважанням оліготрофних бактерій (ЕБ/ОБ < 1,0). Лише на пригреблевій ділянці (біля с. Козаровичі) евтрофні бактерії переважали над оліготрофними (ЕБ/ОБ > 1,0), що свідчить про наявність у воді значної кількості легко-окиснюваної органічної речовини. Окрім накопичення органічної речовини у воді водосховища від середньої до пригреблевої ділянок, можна припустити також вилив стоку р. Ірпін.

За величинами чисельності евтрофних бактерій, відповідно до системи комплексної оцінки якості поверхневих вод [11], на середній ділянці водосховища за станом вод реєстрували ІІ клас, 2-гу категорію — «дуже добрі» та ІІІ клас, 4-ту категорію — «задовільні». На пригреблевій ділянці

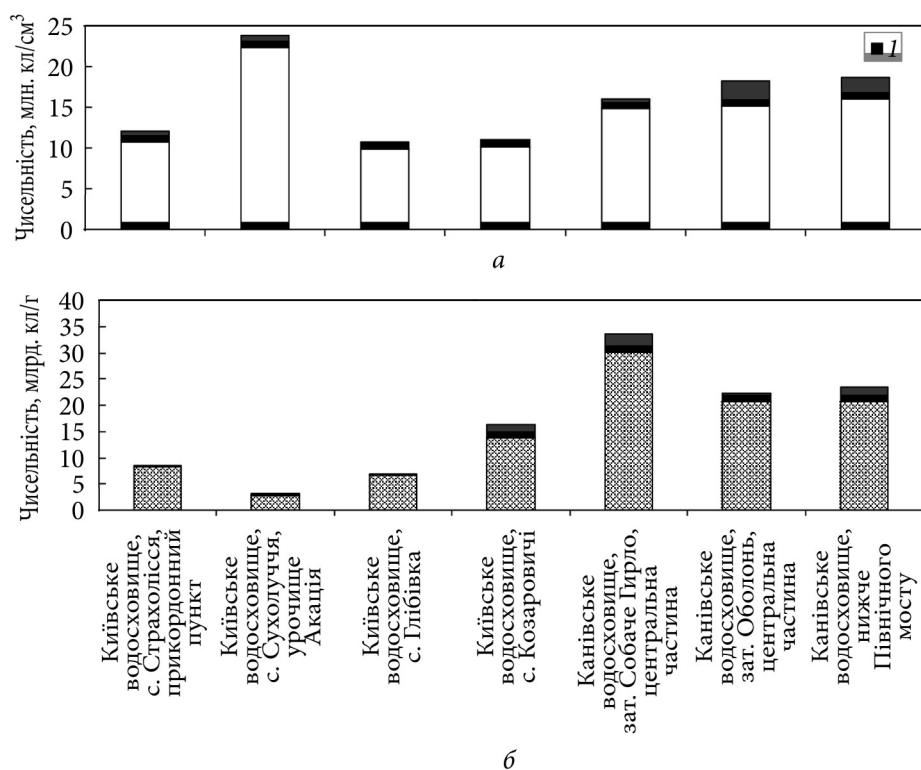


Рис. 2. Чисельність бактеріопланктону (а) та бактеріобентосу (б), а також бактерій з ушкодженою цитоплазматичною мембраною (1) досліджених ділянок Київського та Канівського водосховищ

фіксували IV клас, 6-ту категорію стану вод — «погані» та V клас, 7-му категорію — «дуже погані». За ступенем чистоти (забрудненості) середня ділянка відповідала категоріям «чисті» — «слабко забруднені», пригреблева ділянка — «брудні» — «дуже брудні».

Антропогенний вплив на водний об'єкт внаслідок надходження теригенного стоку, каналізаційних та стічних вод змінює якість поверхневих вод не лише через забруднення та евтрофування, вода також може стати джерелом надходження до організму людини умовно-патогенних та патогенних бактерій, які здатні викликати захворювання різної етимології. Кількість санітарно-показових бактерій у воді водосховища коливалася від 1,1 до 180,3 тис. КУО/100 см³ (див. рис. 1). У всіх досліджених зразках води були відсутні *Pseudomonas aeruginosa* та *Proteus mirabilis*. Найбільше різноманіття представників потенційно патогенних мікроорганізмів та їхню кількість спостерігали на ділянці біля с. Козаровичі (рис. 5). По всій акваторії водосховища кількість коліформних бактерій у складі санітарно-показових мікроорганізмів становила від 1,1 до 12,9 тис. КУО/100 см³. Не фіксували перевищень за санітарно-мікробіологічними нормами чисельності *E. coli* на ділянках водосховища біля сіл Страхолища

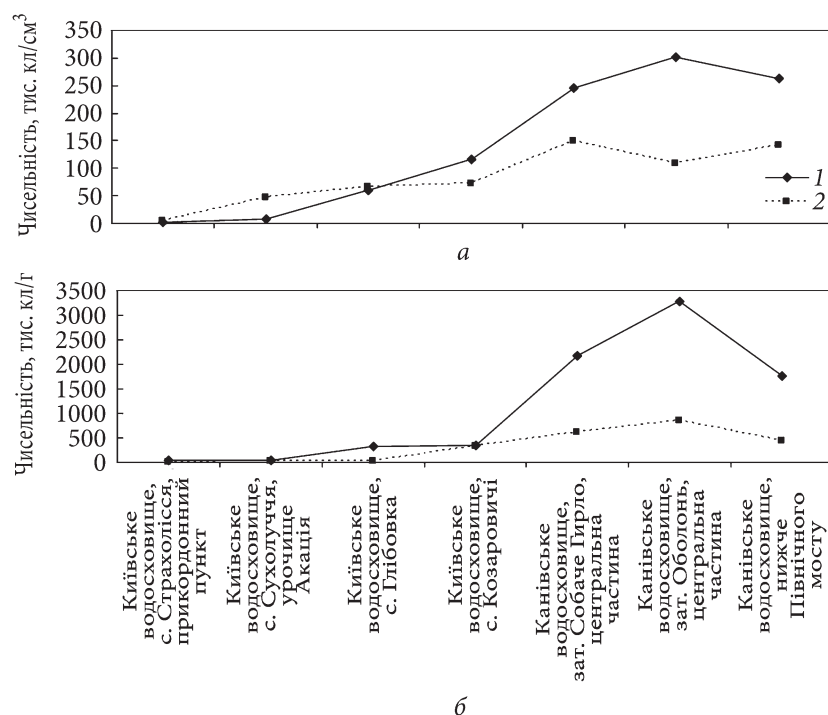


Рис. 3. Чисельність евтрофних (1) і оліготрофних бактерій (2) у воді (а) та донних відкладах (б) досліджених ділянок водосховищ (вздовж течії з півночі на південь)

та Глібівка. На ділянках біля сіл Сухолуччя та Козаровичі, де коли-індекси становили відповідно 9000 та 59 500, кількість кишкової палички перевищувала умовну норму відповідно у 1,8 та 11,9 разів. Також на цих ділянках відзначали значну кількість стафілококів. Вміст цієї групи бактерій у воді хоч і не нормується законодавством, але вона включає патогенних та умовно-патогенних представників, які супроводжують харчове отруєння, інфекції шкіри і слизових оболонок, інші захворювання людей [7]. Виявлена кількість фекальних ентерококів, які також індують нещодавнє надходження фекалій в оточуюче середовище, на всіх ділянках була в межах норми, не перевищуючи 400 КУО в 100 см³ (відповідно до норм Європейського Союзу — Директива 2006/7/ЕС).

Бактеріобентос. На досліджених ділянках водосховища чисельність бактеріобентосу змінювалась у межах від 3,2 до 16,4 млрд. кл/г (в середньому 8,8±5,6) (див. рис. 2, б). Кількість мертвих бактерій у донних відкладах водосховища становила 0,2—2,7 млрд.кл/г, що складало від 2,8 до 16,5 % (в середньому 9,2±5,9 %) чисельності бактеріобентосу. Найвищу абсолютну чисельність та відносну частку мертвих клітин відмічено для пригреблевої ділянки (біля с. Козаровичі).

Кількість ЕБ у донних відкладах досліджених ділянок варіювала від 35,6 до 348,0 тис. кл/г, а ОБ — від 5,4 до 333,0 тис. кл/г (див. рис. 3, б). Чисельність евтрофних бактерій зростала від середньої до пригреблевої



Рис. 4. Відношення чисельності евтрофних до оліготрофних бактерій у воді (1) та донних відкладах (2) досліджених водосховищ (літо, 2021 р.)

ділянки водосховища. Найбільшу кількість оліготрофних бактерій також спостерігали на ділянці, що знаходиться найближче до греблі Київської ГЕС (ділянка біля с. Козаровичі).

Співвідношення ЕБ/ОБ у донних відкладах змінювалось від 1,0 до 18,7 (в середньому 7,1), що вказує про переважання у бактеріобентосі водосховища евтрофних бактерій, а отже — легкоокиснюваної органічної речовини (див. рис. 4).

Відсоткове відношення чисельності евтрофних бактерій до чисельності бактеріобентосу було у межах 0,0004—0,0046 % (в середньому 0,0021 %). За умовною класифікацією [20] індекс ЕБ/ЧББ характеризує стан водосховища як «норма».

Канівське водосховище. Бактеріопланктон. На досліджених ділянках водосховища ЧБП змінювалась у межах від 16,0 до 18,7 млн. кл/см³ (див. рис. 2, а). Тобто, величини чисельності бактерій у воді різних ділянок верхньої частини водосховища були подібними і становили в середньому $17,6 \pm 1,4$ млн. кл/см³. Кількість бактерій з ушкодженою цитоплазматичною мембраною у воді складала $1,1—3,0$ млн. кл/см³, що становило від 6,9 до 16,5 % (в середньому $12,6 \pm 5,0$ %) чисельності бактеріопланктону.

Чисельність евтрофних бактерій у воді досліджених ділянок варіювала від 244,8 до 302,4 тис. кл/см³ (див. рис. 3, а). Кількість оліготрофних бактерій становила від 107,6 до 148,0 тис. кл/см³. По акваторії верхньої частини водосховища у цей спекотний період з високими температурами повітря та води спостерігали високі величини чисельності представників як евтрофних, так і оліготрофних бактерій при незначному варіюванні вмісту цих груп на різних ділянках, в середньому відповідно $270,1 \pm 29,4$ та $132,4 \pm 21,7$ тис. кл/см³.

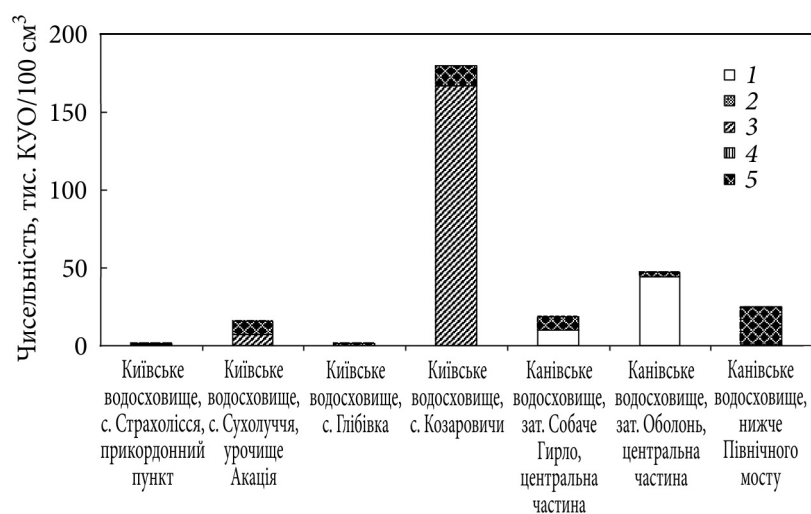


Рис. 5. Розподіл санітарно-показових бактерій у водній товщі Київського та Канівського водосховищ влітку 2021 р.: 1— *Enterococcus faecalis*; 2 — *Pseudomonas aeruginosa*; 3 — *Staphylococcus aureus*; *St. epidermides*; 4 — *Salmonella* spp.; 5 — *E. coli* і коліформні бактерії

Доля ЕБ у складі бактеріопланктону складала 1,41—1,66 % (в середньому 1,53 %) , що характеризує стан води за цим показником як «брудна».

Внаслідок істотного переважання у бактеріопланктоні верхньої частини Канівського водосховища евтрофних бактерій, співвідношення ЕБ/ОБ складало від 1,7 до 2,8 (в середньому 2,1) (див. рис. 4), що свідчить про процеси евтрофування та накопичення органічної речовини у водоймі, яка знаходиться в межах великого міста.

За системою комплексної оцінки якості поверхневих вод [11], на всіх досліджених ділянках Канівського водосховища у цей період за показниками чисельності евтрофних бактерій спостерігали стан вод, що відповідав V класу 7-ї категорії — «дуже погані», за ступенем чистоти вод — «дуже брудні».

Вміст санітарно-показових бактерій у воді досліджених ділянок водосховища складав від 18,3 до 46,8 тис. КУО/100 см³ (див. рис. 1). Найбільшу кількість умовно-патогенних бактерій на верхній ділянці Канівського водосховища відмічено для затоки Оболонь (див. рис. 5). На всіх ділянках водосховища фіксували перевищення чисельності кишкової палички за санітарно-мікробіологічними нормами у 1,0—16,0 разів, а колііндекс складав від 5000 до 80 000. Також по акваторії водосховища реєстрували значну (2,4—24,7 тис. КУО/100 см³) кількість коліформних бактерій, які можуть вказувати на нещодавнє фекальне забруднення води. Кількість *Enterococcus faecalis* у воді водосховища перевищувала норму у 1,5—111,0 разів (в середньому у 46,0). Найвищі величини цього показника відмічали також у затоці Оболонь.

Бактеріобентос. На досліджених ділянках водосховища ЧББ варіювала від 22,3 до 33,6 млрд. кл/г (в середньому $26,5 \pm 6,2$) (див. рис. 2, б). Найвищі показники реєстрували у детритних мулах затоки Собаче Гирло. Кількість мертвих бактерій у донних відкладах ділянок водосховища становила 1,7—3,4 млрд. кл/г, що складало від 7,4 до 11,5 % (в середньому $9,6 \pm 2,1$ %) чисельності бактеріобентосу.

Чисельність евтрофних бактерій у донних відкладах досліджених ділянок складала від 1771,0 до 3292,0 тис. кл/г, оліготрофних бактерій — від 440,0 до 838,0 тис. кл/г (див. рис. 3, б). Просторовий розподіл величин ЕБ та ОБ був подібним, що може свідчити про узгоджену залежність розвитку мікроорганізмів еколого-трофічних груп від якості автохтонної та алохтонної органічної речовини у донних відкладах.

Співвідношення ЕБ/ОБ у донних відкладах було 3,6—4,0 (в середньому 3,8), що свідчить про домінування у бактеріобентосі водосховища евтрофних бактерій (див. рис. 4). Абсолютні та відносні показники чисельності ЕБ вказують на значну кількість депонованої легкодоступної органічної речовини у донних відкладах, причиною чого може бути суттєве антропогенне евтрофування поверхневих вод в межах м. Києва.

Екологічна ситуація на верхній ділянці водосховища, оцінена за індексом ЕБ/ЧББ [20], демонструє «норму» на всіх ділянках, окрім затоки Оболонь, що опинилась в категорії «стан ризику».

Порівняння досліджених мікробіологічних характеристик двох водосховищ показало істотне переважання показників кількісного розвитку евтрофних та оліготрофних груп бактерій у воді верхньої ділянки Канівського водосховища на тлі близьких співмірних показників чисельності бактеріопланктону водосховищ. Вивчені кількісні показники розвитку бактеріобентосу були значно вищими на верхній ділянці Канівського водосховища порівняно з Київським. Особливо істотним було переважання чисельності евтрофних та оліготрофних бактерій (більше ніж в 10 та 6 разів, відповідно). Розподіл певних груп умовно патогенних бактерій носив локальний характер, з найвищими сукупними показниками чисельності на ділянці біля с. Козаровичі (пригреблева ділянка Київського водосховища) та у затоці Оболонь (верхня ділянка Канівського водосховища). Індикаторні співвідношення засвідчують умовно кращу екологічну ситуацію на середній ділянці Київського водосховища порівняно з пригреблевою ділянкою та верхньою ділянкою Канівського водосховища в межах м. Києва.

Усі досліджені абіотичні параметри (прозорість, рН, температура води, вміст кисню у воді, азоту амонійного, нітритного, нітратного, фосфору фосфатів, перманганатна окиснюваність (ПО), дихроматна окиснюваність (ДО), співвідношення ПО/БО) [12] спільно з мікробіологічними показниками, які описано вище, були проаналізовані методом кореляційного аналізу за Спірменом. Виявлена достовірна кореляція дозволяє встановити закономірності та тенденції взаємозалежності провідних абіотичних чинників та показників, що характеризують прокаріотичну мікробіоту.

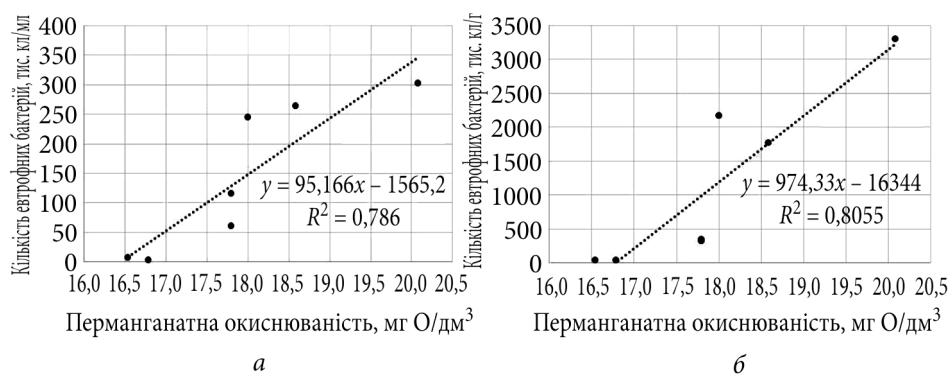


Рис. 6. Залежність кількості евтрофних бактерій в планктоні (а) та бентосі (б) від вмісту органічної речовини у воді (за ПО, мг О/дм³) досліджених ділянок водосховищ

Встановлено достовірну позитивну кореляцію між концентрацією органічної речовини, визначеною за показником перманганатної окиснюваності, та кількістю евтрофних бактерій в планктоні ($r_s = 0,95$, $p < 0,01$) (рис. 6, а) та бентосі ($r_s = 0,91$, $p < 0,01$) (рис. 6, б). Тобто, попри істотні величини вмісту органічної речовини у воді (16—20 мг О/дм³), спостерігалось узгоджене варіювання кількості евтрофних бактерій та величини ПО. Тісні зв'язки підтверджують гіпотезу про забруднення водосховищ неочищеними або частково очищеними побутовими та стічними водами, теригенним стоком з берегів (випас худоби, сільськогосподарська діяльність, рекреація населення тощо) та урбанізованих територій.

Також виявлено зв'язок між вмістом амонійного азоту та чисельністю деяких груп потенційно патогенних бактерій. Попри те, що зазвичай зростання вмісту амонійного азоту свідчить про надходження до водойми недостатньо очищених стоків з високим вмістом сечовини, кількість *E. coli* та *Klebsiella* spp. достовірно знижувалась (рис. 7).

Досліджені нами водосховища з різною інтенсивністю вивчалися мікробіологами протягом майже всього періоду їхнього існування. Порівняння сучасних величин кількісних показників розвитку бактеріопланктону з даними минулих періодів показало істотне зростання чисельності бактерій протягом останніх 20 років [4, 5, 9, 12, 15]. Чисельність бактерій у воді співмірна з показниками природних угруповань бактеріопланктону до зарегулювання р. Дніпро [2].

Аномально висока температура води досліджених ділянок (28—30 °C) сукупно з високою температурою атмосферного повітря (31—37 °C) створили сприятливі умови для чисельного розвитку евтрофних бактерій, кількість яких в десятки разів перевищувала величини, які реєстрували в літні періоди за нижчих температур [12, 15]. Цьому також сприяло істотне погіршення якості води в цей період, засвідчене Держводагентством України (Міжрегіональним офісом захисних масивів дніп-

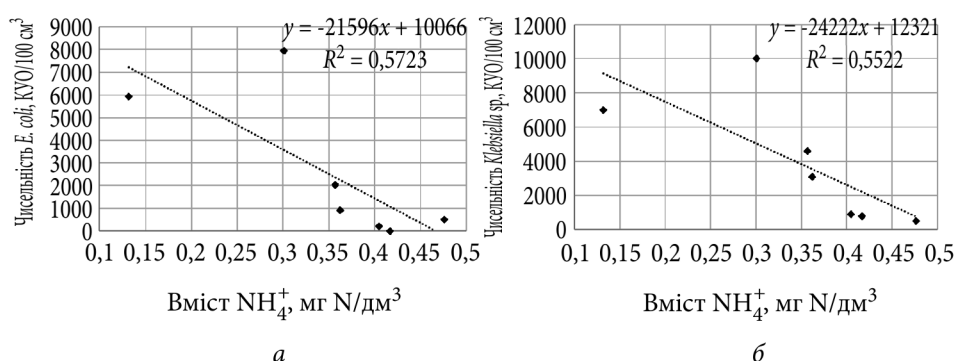


Рис. 7. Залежність кількості бактерій *E. coli* (а) та *Klebsiella* spp. (б) від вмісту амонійного азоту (мг N/дм³) у воді досліджених ділянок водосховищ

ровських водосховищ) (<https://mozmdv.gov.ua/wp-content/uploads/2022/02/7.06.2021-07.2021-SAJT.pdf>).

Таким чином, відмінності у кількісних показниках розвитку угруповань бактеріопланктону та бактеріобентосу засвідчують несхожість умов існування цих угруповань та інших груп гідробіонтів, які формуються у системі двох гідрологічно взаємодіючих водосховищ на великій рівнинній річці. Реакція угруповань бактерій у воді та донних відкладах, що полягала у відповідному зростанні чисельності певних структурних складових, відображає підвищення інтенсивності функціонування у відповідь на органічне забруднення різної природи та складу.

Наявність у досліджених зразках індикаторних груп умовно-патогенних та патогенних мікроорганізмів засвідчує потенційну небезпеку комплексного використання водойм на деяких ділянках водосховищ (пригреблева ділянка Київського водосховища, затока Оболонь Канівського водосховища).

Висновки

Бактеріопланктон та бактеріобентос середньої та пригреблевої ділянок Київського водосховища, верхньої ділянки Канівського водосховища р. Дніпро, досліджений у липні 2021 р. в умовах аномально високих температур води та повітря, характеризувався високими показниками кількісного розвитку та локальними відмінностями. Середні показники чисельності бактеріопланктону були подібними (Київське водосховище — $14,4 \pm 6,2$ млн. кл/см³, Канівське водосховище — $17,6 \pm 1,4$ млн. кл/см³), при більшому діапазоні варіювання в Київському водосховищі. Чисельність бактеріобентосу була значно вищою на верхній ділянці Канівського водосховища (в середньому $26,5 \pm 6,2$ млрд. кл/г), порівняно з Київським водосховищем (в середньому $8,8 \pm 5,6$ млрд. кл/г), при подібному діапазоні варіювань.

Істотні відмінності виявлені у чисельності різних еколого-трофічних груп бактерій води та донних відкладів: евтрофні та оліготрофні бактерії

були більш чисельними у Канівському водосховищі, ніж у Київському. Їхнє співвідношення було >1 у Канівському порівняно з Київським водосховищем ($ЕБ/ОБ < 1$). Це опосередковано свідчить про переважання легкодоступної органічної речовини на верхній ділянці Канівського водосховища в умовах точкових забруднень річкової ділянки, яка знаходиться в межах великого міста (м. Київ).

Встановлено достовірну пряму позитивну залежність ($p < 0,01$) між чисельністю евтрофних бактерій у воді та донних відкладах і вмістом органічної речовини (за ПО).

Згідно з екологічною класифікацією якості поверхневих вод, за показником чисельності планктонних евтрофних бактерій середня ділянка Київського водосховища відносилась до категорій «дуже добрі» — «задовільні», II, III класів якості; пригреблева ділянка — «погані» — «дуже погані», IV та V класів якості. Досліджені ділянки Канівського водосховища відповідали категорії «дуже погані», V класу якості.

Вміст потенційно патогенної мікрофлори був найбільшим у пригреблевій ділянці Київського водосховища (основні складові — *E. coli* і коліформні бактерії та бактерій р. *Staphylococcus*) та у затоці Оболонь Канівського водосховища (бактерії р. *Enterococcus*).

Список використаної літератури

1. Водний фонд України: Штучні водойми — водосховища і ставки: Довідник / За ред. В.К. Хільчевського, В.В. Гребеня, В.А. Сташук, О.В. Чунарьов, О.Є. Ярошевич. Київ : Інтерпрес ЛТД, 2014. 164 с.
2. Гак Д.З. Бактериопланктон и его роль в биологической продуктивности водохранилищ. Москва : Наука, 1975. 251 с.
3. Гидроэкология украинского участка Дуная и сопредельных водоемов / Под ред. В.Д. Романенко. Киев : Наук. думка, 1993. 328 с.
4. Головки Т.В., Багнюк Л.И. Пространственно-временная характеристика бактериопланктона верхней части Каневского водохранилища. *Гидробиол. журн.* 2009. Т. 45, № 4. С. 73—81.
5. Головки Т.В., Якушин В.М., Тронько Н.И. Особенности функционирования бактериопланктона верхнего участка Каневского водохранилища на современном этапе его существования. *Там же*. 2010. Т. 46, № 5. С. 90—101.
6. Жадан Т.О., Грек А.М., Шевцова О.О. та ін. Мікробіологічне забруднення водних джерел та проблеми його контролю. *Системи обробки інформації*. 2007. Т. 65, № 7. С. 109—115.
7. Медична мікробіологія, вірусологія та імунологія; за ред. В.П. Широбокова. Вінниця : Нова Книга, 2021. 920 с.
8. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В.Д. Романенка. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
9. Михайленко Л.Е. Бактериопланктон днепровских водохранилищ. Киев : Ин-т гидробиологии НАН Украины, 1999. 300 с.
10. Романенко В.Д. Основи гідроекології. Київ : Генеза, 2004. 664 с.
11. Романенко В.Д., Жукинський В.М., Оксюк О.П. Методика встановлення і використання екологічних нормативів якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. Київ : Мінекоресурсів України, 2001. 48 с.
12. Романенко В.Д., Якушин В.М., Щербак В.І. та ін. Біорізноманіття та біоресурсний потенціал екосистем дніпровських водосховищ в умовах кліматичних змін і розвитку біологічної інвазії. Київ : Наук. думка, 2019. 255 с.

13. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Ленинград : Наука, 1985. 295 с.
14. Словник-довідник з екології: Навч.-метод. посіб.; за ред. О.Г. Лановенко, О.О. Остапішина. Херсон, 2013. 225 с
15. Якушин В.М., Головка Т.В., Каленіченко К.П., Лінчук М.І. Оцінка процесів формування якості води на Київській ділянці Канівського водосховища за деякими гідрохімічними та мікробіологічними показниками. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2004. Т. 6. С. 267—272.
16. Ashbolt N.J. Microbial contamination of drinking water and human health from community water systems. *Curr. Environ. Health Rep.* 2015. Vol. 2, N 1. P. 95—106.
17. Cole J., Findlay S., Pace M. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 1988. Vol. 43, N 1—2. P. 1—10.
18. Cotner J.B., Biddanda B.A. Small players, large role: microbial influence on biogeochemical processes in pelagic aquatic ecosystems. *Ecosystems*. 2002. Vol. 5, N 2. P.105—121.
19. Crabtree K.D., Gerba C.P., Rose J.B. et al. Waterborne adenovirus: a risk assessment. *Water Sci. Technol.* 1997. Vol. 35, N 11—12. P. 1—6.
20. Dzyuban A.N., Kosolapov D.B., Kuznetsov I.A. Microbiological processes in bottom sediments of the Rybinsk Reservoir and Lake Pleshcheyev as factor forming the quality of aquatic environment. *Hydrobiol. J.* 2005. Vol. 41, № 6. С. 78—84.
21. Górniak D., Olejnik G., Świątecki A. Refraction of bacterioplankton of lakes surrendered reclamation and biomanipulation. *Acta Universitatis N. Copernici. Prace Limnologiczne XXIII — Nauki Matematyczno-Przyrodnicze*. Toruń, 2003. Zeszyt 100. S. 107—121.
22. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4, N 1. P. 1—9.
23. Methods in microbiology / Ed. by in J.H. Paul. USA : Academic Press, 2001. Vol. 30. 657 p.
24. Newton R.J., Jones S.E., Eiler A. et al. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2011. Vol. 75, N 1. P. 14—49.
25. Oleynik G.N., Starosila Ye.V. Microbiological characteristic of the water bodies with high antropogenic impact. *Hydrobiol. J.* 2005. Vol. 41, N 6. P. 66—77.
26. Oleynik G.N., Starosila Ye.V. Structure and functioning of bacterioplankton and bacteriobenthos in the water bodies with high content of inorganic nitrogen. *Ibid.* 2010. Vol. 46, N 6. P. 26—36.
27. Oleynik G.N., Yurishinets V.I., Starosila Ye.V. Bacterioplankton and bacteriobenthos as biological indicators of aquatic ecosystem state. *Ibid.* 2011. Vol. 47, N 2. P. 37—48.
28. Pernthaler J., Amann R. Fate of heterotrophic microbes in pelagic habitats: focus on populations. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2005. Vol. 69, N 3. P. 440—461.
29. Romanenko V.D. The Dnieper reservoirs, their significance and problems. *Hydrobiol. J.* 2018. Vol. 54, N 3. P. 3—9.
30. Starosyla Ye.V. Conditionally pathogenic and pathogenic microorganisms in hydrosystems and their role in water quality assessment (a review). *Ibid.* 2021. Vol. 57, N 4. P. 27—35.

Надійшла 07.04.2023

Ye. V. Starosyla, Ph. D. (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, 04210, Ukraine
e-mail: jenya_star@ukr.net
ORCID 0000-0001-5366-7894

V.I. Yuryshynets, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, 04210, Ukraine
e-mail: ciliator@ukr.net
ORCID 0000-0001-6310-7874

BACTERIOPLANKTON AND BACTERIOBENTHOS AS ECOLOGICAL
INDICATORS OF THE RESERVOIRS' ECOLOGY-SANITARY STATE AND THE
SAFETY OF WATER USE

Bacterioplankton and bacteriobenthos of the middle and lower sections of the Kyiv Reservoir, the upper section of the Kaniv Reservoir of the Dnipro River, studied in July 2021 under conditions of abnormally high water and air temperatures, were characterized by high values of indicators of quantitative development and local differences. The average numbers of bacterioplankton were similar (Kyiv Reservoir — $14.4 \pm 6.2 \cdot 10^6$ cells/cm³, Kaniv Reservoir — $17.6 \pm 1.4 \cdot 10^6$ cells/cm³), with a greater range of variation in the Kyiv Reservoir. The number of bacteriobenthos was significantly higher in the upper section of the Kaniv Reservoir (Kyiv Reservoir — $8.8 \pm 5.6 \cdot 10^9$ cells/g, Kaniv Reservoir — $26.5 \pm 6.2 \cdot 10^9$ cells/g). Significant differences were found in the number of different trophic groups of bacteria: eutrophic and oligotrophic bacteria were more numerous in the Kaniv Reservoir; their ratio (EB/OB) was <1 in the Kyiv Reservoir and >1 in the Kaniv Reservoir. This indirectly indicates the predominance of easily available organic matter in the upper section of the Kaniv Reservoir in conditions of hot-spot pollution of the river section, which is located within the boundaries of a large city (Kyiv). The significant direct positive correlation ($p < 0.01$) was established between the number of eutrophic bacteria in plankton and benthos and the content of organic matter (according to PO). According to the ecological classification of the quality of surface water based on the number of planktonic eutrophic bacteria, the middle section of the Kyiv Reservoir belonged to the categories «very good» — «satisfactory», II, III quality classes, the raking section — «bad» — «very bad», IV and V quality classes. The investigated areas of the Kaniv Reservoir corresponded to the «very bad» category, class V. The content of opportunistic microflora was the highest in the lower section of the Kyiv Reservoir (the main components were *Escherichia coli* & *coliform* and *Staphylococcus* spp.) and in the Obolon Bay of the Kaniv Reservoir (*Enterococcus* spp.).

Keywords: bacterioplankton, bacteriobenthos, sanitary indicator microorganisms, biological indication, reservoirs.