

УДК 504.4.054:556.114(282.247.32)

П.М. ЛИННИК, д. х. н., проф., зав. відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна,
e-mail: peter-linnik@ukr.net
ORCID 0000-0002-2144-4052

ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ У ВОДІ ВОДОСХОВИЩ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ ПІСЛЯ ЗАРЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ ДНІПРА¹

У статті узагальнено та проаналізовано багаторічні зміни концентрації органічних речовин у р. Дніпро до зарегулювання її стоку та у водосховищах Дніпровського каскаду після їхнього заповнення і подальшого функціонування. Вона логічно продовжує низку робіт, в яких розглядаються особливості динаміки основних компонентів гідрохімічного режиму річки і споруджених на ній водойм у різні періоди досліджень. Аналіз результатів багаторічних досліджень показує, що у формуванні органічних речовин водосховищ на різних етапах їхнього існування важливу роль відігравали привнесення їх зі стоком річок, вимивання з ґрунтів ложа водосховищ та вилучення зі складу залишків рослинного і тваринного походження, а також продукування значних кількостей у періоди масового розвитку водоростей («цвітіння» води). Тому концентрація органічних речовин істотно зростала саме в ці періоди. У компонентному складі розчинених органічних речовин водосховищ Дніпровського каскаду домінують гумусові речовини, частка яких змінюється з 76,5 % від загального вмісту розчинених органічних речовин у воді Київського водосховища до 52,8 % — у воді Каховського водосховища. У періоди інтенсивного розвитку фітопланктону зростає концентрація вуглеводів та білкових сполук, а відтак, і їхня частка у загальному балансі органічних речовин. Зниження інтенсивності цього процесу зумовлює деяке зменшення концентрації органічних речовин у цілому. Узагальнення результатів багаторічних досліджень органічних речовин у водосховищах Дніпровського каскаду набуває особливої актуальності в сучасних умовах їхнього функціонування, оскільки вони пройшли декілька етапів свого становлення та зазнають впливу кліматичних змін. За таких умов слід очікувати змін не лише у кількісних показниках вмісту органічних речовин у водосховищах, але і в їхньому компонентному складі внаслідок трансформації за підвищеної температури води і інтенсифікації мікробіологічної активності та дії сонячної радіації.

Ключові слова: органічні речовини, водосховища Дніпровського каскаду, легкоокиснювані органічні речовини, гумусові речовини, вуглеводи, білковоподібні речовини.

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

Ц и т у в а н н я: Линник П.М. Органічні речовини у воді водосховищ Дніпровського каскаду після зарегулювання стоку Дніпра. *Гідробіол. журн.* 2022. Т. 58. № 1. С. 81—100.

Органічні речовини — це важлива компонента хімічного складу поверхневих вод, яка істотним чином впливає на стан водного середовища як середовища мешкання гідробіонтів та визначає якість води. Органічні речовини — резервуар органічного карбону та низки інших важливих хімічних елементів, які необхідні для розвитку і життєдіяльності гідробіонтів. Основу органічних речовин поверхневих вод складають природні органічні сполуки, зокрема гумусові речовини (ГР), вуглеводи, білковоподібні речовини (БПР) та деякі інші. Однак не слід нехтувати впливом антропогенного чинника на формування хімічного складу поверхневих водних об'єктів, у тому числі на формування компонентного складу органічних речовин, внаслідок надходження до них не властивих їм органічних сполук — ксенобіотиків.

Серед природних органічних речовин поверхневих вод найбільшого поширення набули ГР, частка яких у загальному балансі досягає від 50 % у річках до 90 % — у болотних водах [29, 32, 38]. Найчастіше ці речовини відносять до органічних сполук теригенного походження, оскільки вони вимиваються з ґрунтового комплексу та надходять до річок і водойм з поверхневим стоком. Вони утворюють групу алохтонних органічних речовин. Однак наявні дані стосовно формування так званого «водного гумусу» у самих водоймах, який сприймається вже як автохтонна група органічних речовин. До зазначеної групи відносять також вуглеводи та БПР, концентрація яких значною мірою залежить від інтенсивності розвитку біоти, зокрема фітопланктону, вищої водної рослинності, іхтіофауни, мікроорганізмів тощо, та подальшого її відмирання і вилучення із залишків відмерлих організмів зазначених органічних речовин [22, 24—26, 29, 30, 37].

Позитивний вплив органічних речовин на розвиток гідробіонтів зумовлений, передусім, ступенем їхнього засвоєння. Надзвичайно важлива роль у цьому процесі належить легкоокиснюваним органічним речовинам, таким як вуглеводи та БПР, оскільки вони здатні до трансформації і утворення біодоступних фракцій в умовах активізації бактеріальної деструкції. Асиміляція ГР ускладнюється тим, що це високомолекулярні речовини, які зазнають біологічної деструкції меншою мірою. Водночас вона відбувається за дії сонячної радіації з утворенням сполук з меншою молекулярною масою, здатних до засвоєння гідробіотою [28, 31, 40].

Підвищений вміст у воді ГР має також негативні наслідки. По-перше, у поверхневому шарі води знижується інтенсивність фотосинтезу через слабку проникність сонячного світла [36]. По-друге, високі концентрації ГР ускладнюють процес підготовки води для питних цілей та можуть погіршувати її якість через появу канцерогенних речовин при хлоруванні й озонуванні води [36].

В то й же час відомо, що розчинені органічні речовини (РОР) поверхневих вод відіграють важливу роль у міграції та розподілі металів між абіотичними і біотичними компонентами, трансформації їхніх сполук у біодоступні або ж, навпаки, з обмеженою біодоступністю для гідробіонтів, та детоксикації [12, 34, 37]. Цілком очевидно, що забруднення поверх-

невих вод органічними ксенобіотиками, у тому числі ціанотоксинами (продукти виділення ціанобактерій), погіршує якість водного середовища та ускладнює систему питної водопідготовки.

Отже, роль органічних речовин у поверхневих вод слід оцінювати як багатогранну, і тому результати їхнього дослідження в умовах сьогодення саме з цих позицій набувають своєї актуальності.

Метою цієї роботи стало узагальнення результатів досліджень органічних речовин у воді річок Прип'яті та Дніпра до спорудження на ньому каскаду водосховищ та аналіз змін їхньої концентрації у споруджених водоймах у процесі їхнього багаторічного існування.

Матеріал і методика досліджень

Коротку характеристику водосховищ Дніпровського каскаду наведено у попередній статті², яка стосується узагальнення результатів досліджень біогенних речовин. Зазначимо лише, що для узагальнення матеріалів, пов'язаних з вивченням органічних речовин у річках Прип'ять та Дніпро до спорудження водосховищ і в самих водосховищах Дніпровського каскаду, залучались раніше опубліковані монографічні роботи, статті та відповідні дані, що містяться у фондах відділу прісноводної гідрохімії Інституту гідробіології НАН України [1, 4, 5, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 21, 27, 35, 39].

Експедиційні дослідження, які проводились з 2008 р., стосувались переважно Київського (середня і нижня ділянки) та Канівського (головним чином верхня ділянка) водосховищ. Проби води відбирали як з поверхневого (на глибині $\approx 0,5$ м), так і з придонного ($\approx 0,5$ м від поверхні донних відкладів) горизонтів за допомогою батометра Рутнера. Завислі речовини вилучали шляхом мембранної фільтрації з використанням мембранних фільтрів *Synpor* (Чехія) з діаметром пор 0,4 мкм. Для визначення показників хімічного споживання кисню (XSK_{Mn} і XSK_{Cr}) застосовували загальноприйняті методики аналізу [14, 22].

Розділення РОР на окремі групи здійснювали методом іонообмінної хроматографії з використанням скляних колонок, заповнених целюлозними сорбентами ДЕАЕ (діетиламіноетилцелюлоза) і КМ (карбоксиметилцелюлоза) виробництва фірми *SERVA*. Параметри колонок: довжина — 27,5 см, діаметр — 2,5 см, висота шару сорбенту — 4,5 см. Вільний об'єм колонки — 12,5 см³. Для десорбції органічних речовин з колонок з ДЕАЕ-та КМ-целюлозою використовували відповідно 0,3 моль/дм³ розчин NaOH та 0,1 моль/дм³ розчин HCl. В результаті послідовного пропускання фільтратів природної води (0,5—1,0 дм³) через колонки із зазначеними іонообмінниками отримували кислотну, оснóвну і нейтральну групи РОР, в яких домінували відповідно ГР, БПР та вуглеводи. Градувальні графіки для визначення гумінових (ГК) і фульвокислот (ФК) будували з використанням розчинів препаратів цих речовин, вилучених з води Канівського водосховища, попередньо очищених і знесолених. Концент-

²Гідробіол. журн., 2001. Е. 57, № 6.

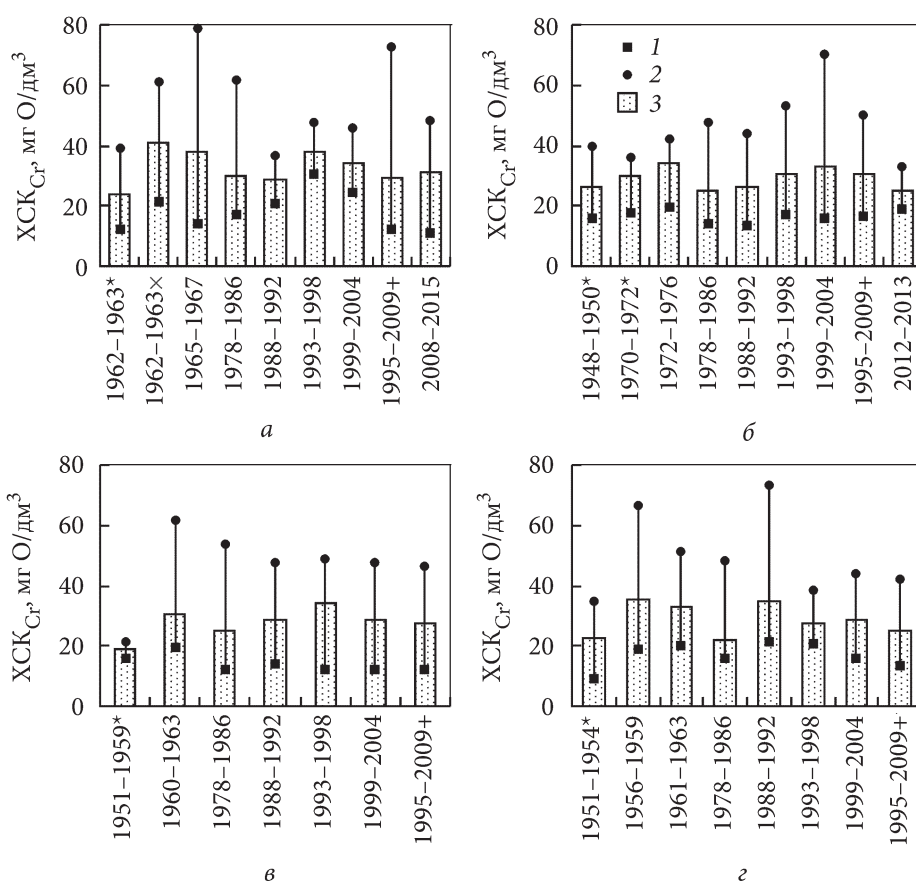


Рис. 1. Граничні (1, 2) та усереднені (3) величини ХСК_{С_г} у воді р. Дніпра до зарегулювання стоку та водосховищ Дніпровського каскаду у різні періоди досліджень. Тут і на рис. 2, 3: а, б, в, г — відповідно Київське, Канівське, Кременчуцьке і Каховське водосховища; * — верхня, середня або нижня ділянки р. Дніпро до зарегулювання стоку; × — р. Прип'ять; + — за даними [16]; результати за 2008—2015 та 2012—2013 рр. взято з [21]

рацію ГК і ФК в отриманій аніонній фракції визначали фотометрично, вимірюючи оптичну густину розчинів цих кислот на фотоелектроколориметрі КФК-2 відповідно при 440 та 400 нм, товщині шару в кюветі 3 см і рН 8,0. Вміст нерозділених ГР у концентратах проб після розділення на колонці з ДЕАЕ-целюлозою визначали фотометричним методом за реакцією азосполучення з діазотованим 4-нітроаналіном [19]. Для визначення вмісту БПР і вуглеводів у складі основної і нейтральної фракцій використовували відповідно реакцію Лоурі та реагент антрон [3, 22].

Результати досліджень та їх обговорення

Особливості формування органічних речовин у водосховищах Дніпра. Нижче (рис. 1, 2) наведено узагальнені результати досліджень стосовно

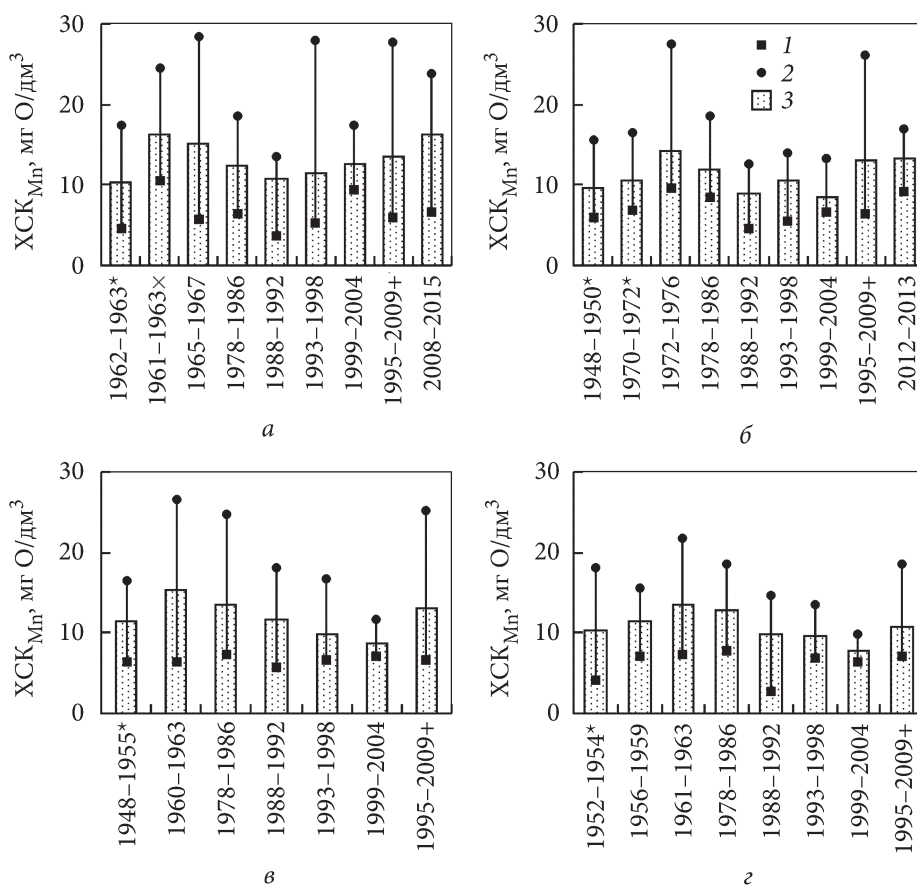


Рис. 2. Граничні (1, 2) та усереднені (3) величини ХСК_{Мп} у воді р. Дніпра до зарегулювання стоку та водосховищ Дніпровського каскаду у різні періоди досліджень

показників хімічного споживання кисню (ХСК_{Cr} і ХСК_{Мп}), які характеризують відповідно загальний вміст РОР (ХСК_{Cr}) та концентрацію легкоокиснюваних РОР (ХСК_{Мп}) у воді різних ділянок Дніпра до зарегулювання його стоку та водосховищ Дніпровського каскаду по мірі їхнього заповнення водою і функціонування у подальші роки.

Із наведених на рисунку 1 даних випливає, що спорудження водосховищ та їхнє функціонування стали причиною підвищення вмісту в них органічних речовин порівняно з р. Дніпро до зарегулювання його стоку. Найбільші показники ХСК_{Cr} характерні для Київського водосховища, оскільки воно знаходиться в гумідній зоні басейну Дніпра. На формування органічних речовин у зазначеному водосховищі істотним чином впливає їхнє надходження зі стоком річок Прип'яті, Дніпра і Тетерева, а також утворення автохтонних органічних сполук у самій водоймі внаслідок розвитку фітопланктону та вищої водної рослинності. Зі стоком Прип'яті надходить найбільше алохтонних органічних речовин, переважно гумусової природи.

Формування РОР у нижче розташованих водосховищах значною мірою залежить від їхнього надходження з вище розташованих водосховищ, а також від інтенсивності їхнього продукування біотою у самих водосховищах.

У перші роки становлення водосховищ концентрація органічних речовин зростала за рахунок їхнього вимивання з ґрунтів ложа, а у подальшому істотний вплив проявляв масовий розвиток водоростей, оскільки саме фітопланктон — це основне джерело надходження органічних речовин у водне середовище [4, 5, 11]. У 90-х роках минулого століття спостерігалось деяке зниження концентрації органічних речовин, що, найвірогідніше, пов'язано з біологічним чинником. Адже після багатьох років масового розвитку водоростей у водосховищах Дніпровського каскаду намітилась тенденція до його зниження. Певною мірою це підтверджується також наведеними на рисунку 2 даними, які стосуються ХСК_{Мп} і характеризують багаторічну динаміку легкоокиснюваних органічних речовин. Тут набагато чіткіше спостерігається зниження величини ХСК_{Мп} саме у 90-х роках минулого століття та на початку ХХІ століття.

Концентрація карбону органічних сполук ($C_{\text{орг}}^3$) у різні періоди досліджень змінювалась у доволі широких межах (рис. 3).

Так, у Київському водосховищі цей інтервал становить від 4,5 до 29,4 мг/дм³, у Канівському — від 4,6 до 26,2, у Кременчуцькому — від 4,5 до 23,2, у Каховському — від 5,2 до 27,4 мг/дм³. Отже, можна стверджувати, що у кожному з досліджуваних водосховищ він мало відрізнявся, але за усередненими показниками концентрація $C_{\text{орг}}$ виявилася дещо більшою у Київському водосховищі і двічі досягала величини більше, ніж 14 мг/дм³ (на початку його існування у 1965—1967 рр. — 14,6 мг/дм³ та у 1993—1998 рр., коли істотно зростав вміст ГР через їхнє надходження зі стоком р. Прип'яті). Дані стосовно концентрації $C_{\text{орг}}$ також свідчать про деяке її зниження у 90-х роках минулого століття, про що вже йшлося вище.

Вниз по каскаду дніпровських водосховищ спостерігається деяке зниження вмісту органічних речовин, зокрема в літній період, що зумовлено впливом низки чинників. Це яскраво ілюструють результати досліджень, виконаних під час проведення українсько-канадської експедиції у вересні 1994 р. і наведених нижче (рис. 4, А). Передусім, це може бути пов'язано з тим, що верхні водосховища Дніпровського каскаду завжди містять значно більші концентрації ГР, що позначається на концентрації РОР у цілому. Крім того, у 90-х роках минулого століття намітилося деяке зменшення концентрації органічних речовин внаслідок зниження інтенсивності розвитку фітопланктону порівняно з періодами масового розвитку водоростей у водосховищах. Нарешті, не слід виключати й ту обставину, що у літню пору року деструкційні процеси у нижче розташованих водосховищах каскаду могли переважати над продукційними [5]. Тому концентрація органічних речовин у воді знижувалась.

³ Розраховано на підставі результатів визначення ХСК_{Cr} ($C_{\text{орг}} = 0,375 \text{ ХСК}_{\text{Cr}}$ [22]).

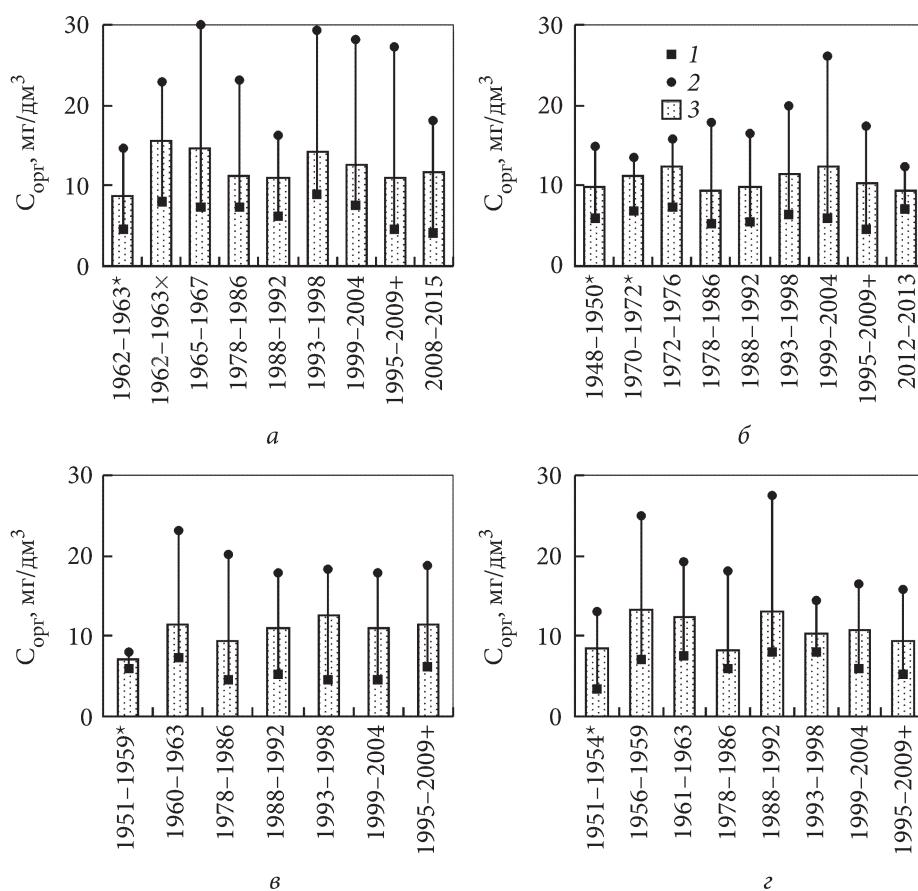


Рис. 3. Граничні (1, 2) та усереднені (3) величини концентрації карбону органічних сполук у воді р. Дніпра до зарегулювання стоку та водосховищ Дніпровського каскаду у різні періоди досліджень

Легкоокиснювані органічні речовини. Нижче (рис. 5) за усередненими показниками наведено багаторічну динаміку загальної концентрації $C_{\text{орг}}$ у воді дніпровських водосховищ та вмісту в них $C_{\text{орг}}$ легкоокиснюваних органічних речовин.

Таке графічне зображення дає можливість наочно представити, яку частку становлять останні у загальному балансі РОР. Результати розрахунку цієї частки представлено на рисунку 6. Можна пересвідчитись, що частка легкоокиснюваних розчинених органічних речовин ($\text{РОР}_{\text{ЛО}}$) у воді Київського водосховища була найбільшою і змінювалась у середньому у межах від 31,9 до 52,2 % від загального вмісту РОР.

В інших водосховищах каскаду вона була дещо нижчою. Так, у Канівському водосховищі $\text{РОР}_{\text{ЛО}}$ становили 24,9—32,5 % загального вмісту РОР, у Кременчуцькому, як найбільш біопродуктивному водосховищі, — 26,2—38,8 %, а в Каховському — 26,5—38,2 %. За весь період досліджень частка $\text{РОР}_{\text{ЛО}}$ у загальному балансі РОР становила в середньому 39,6, 28,4,

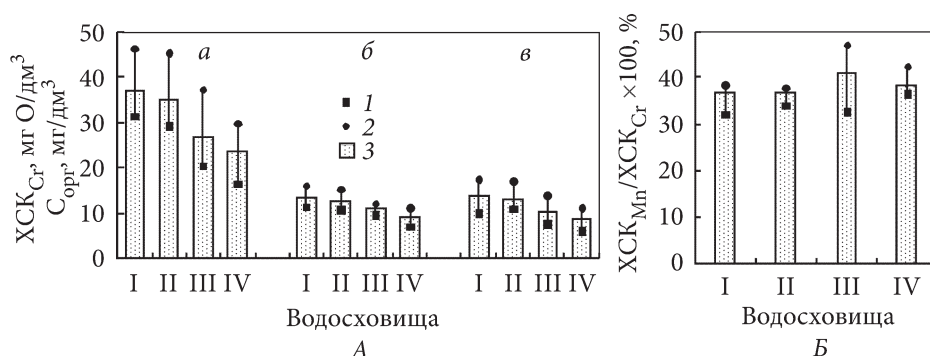


Рис. 4. Характеристики вмісту розчинених органічних речовин (А) та частка легкоокиснюваних органічних речовин (Б) у воді водосховищ Дніпровського каскаду у вересні 1994 р. під час проведення спільної українсько-канадської експедиції: а, б — відповідно XSK_{Cr} і XSK_{Mn}, в — C_{орг}; I, II, III, IV — відповідно Київське, Канівське, Кременчуцьке і Каховське водосховища

33,4 і 31,3 % відповідно для Київського, Канівського, Кременчуцького і Каховського водосховищ. Безперечно, вона була більшою на початковому етапі існування водосховищ, коли відбувалось вимивання органічних сполук із ґрунтів заповненого ложа водосховищ, та в періоди інтенсивного розвитку водоростей. Це можна бачити на прикладі Кременчуцького водосховища, коли частка РОР_{ЛО} у зоні «цвітіння» води у 1964 р. досягала більше 50 % загального вмісту РОР (див. рис. 6).

Цілком очевидно, що частка РОР_{ЛО} у загальному балансі РОР може істотно змінюватись залежно від біопродуктивності водойми. Влітку і частково восени вона може зростати, оскільки в цей період відбувається активний розвиток біоти, яка виділяє позаклітинні органічні речовини-екзometаболіти. У процесі трансформації відмерлих решток водоростей та вищої водної рослинності у воду також виділяється певна частина зв'язаних ними органічних речовин. Зазначені органічні речовини, зазвичай, належать до легкоокиснюваних. За усередненими показниками, частка РОР_{ЛО} у літньо-осінній період виявилась дещо більшою у Кременчуцькому та Каховському водосховищах, що було встановлено під час проведення українсько-канадської експедиції у вересні 1994 р. (рис. 4, Б).

Більш виразно означена ситуація проявляється у малих водоймах урбанізованих територій. Наприклад, в озерах системи Опечень, що знаходяться у межах житлового масиву Оболонь м. Києва, частка таких речовин влітку і восени може зростати відповідно до 62 і 52 % у загальному балансі РОР [10]. Звичайно, водосховища Дніпровського каскаду і малі водойми в м. Києві — це неспівставимі для порівняння водні об'єкти. Тим не менше, для розуміння процесів формування органічних речовин влітку отримані результати можуть бути корисними.

Частка найважливіших груп РОР у загальному їхньому балансі. Як неодноразово повідомлялось [29, 32, 37, 38], найбільшу частку серед РОР

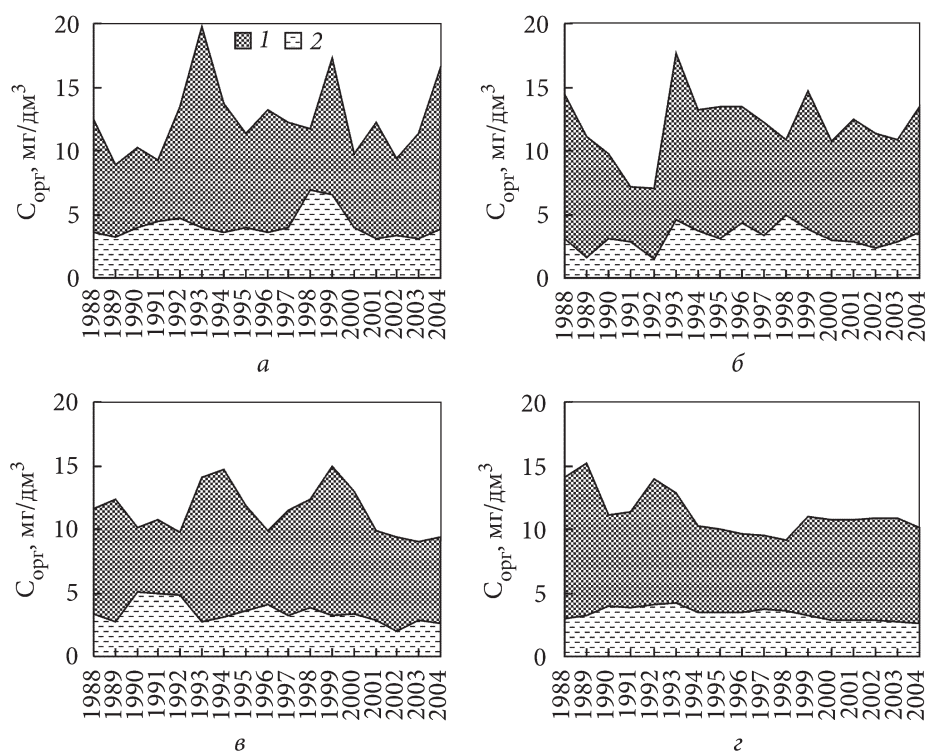


Рис. 5. Усереднені показники загального вмісту карбону органічних сполук ($C_{\text{орг}}$) (1) та $C_{\text{орг}}$ легкоокиснюваних органічних речовин (2) у воді водосховищ Дніпровського каскаду. Тут і на рис. 6—8: а, б, в, з — відповідно Київське, Канівське, Кременчуцьке і Каховське водосховища.

поверхневих вод становлять ГР. У різноманітних поверхневих водних об'єктах вона змінюється в межах 50—80 %, а подекуди навіть досягає 90 % [38]. Прикладом таких об'єктів в Україні можуть бути річки басейну Прип'яті, живлення яких відбувається переважно за рахунок болотних вод.

Слід зазначити, що вивчення компонентного складу POP у водосховищах Дніпра не носило систематичного характеру і проводилось лише епізодично. Найбільшою мірою досліджувались ГР, що відображено в низці монографічних робіт того часу [5, 8, 13]. Детальніші дослідження ГР у водосховищах Дніпровського каскаду виконано у 90-х роках минулого століття, коли POP було розділено на три найважливіші групи методом іонообмінної хроматографії з використанням целюлозних сорбентів [2, 33, 35, 39]. Значний обсяг робіт з вивчення ГР у поверхневих водах України, у тому числі у водосховищах Дніпра, проведено Н.М. Осадчою, а отримані нею результати узагальнено у її докторській дисертації [16]. Певну частину досліджень, виконаних раніше, було присвячено вивченню сполук білкової природи, але з акцентуванням уваги на те, як впливають окремі чинники та процеси на їхню деструкцію [5, 23]. Дослідження

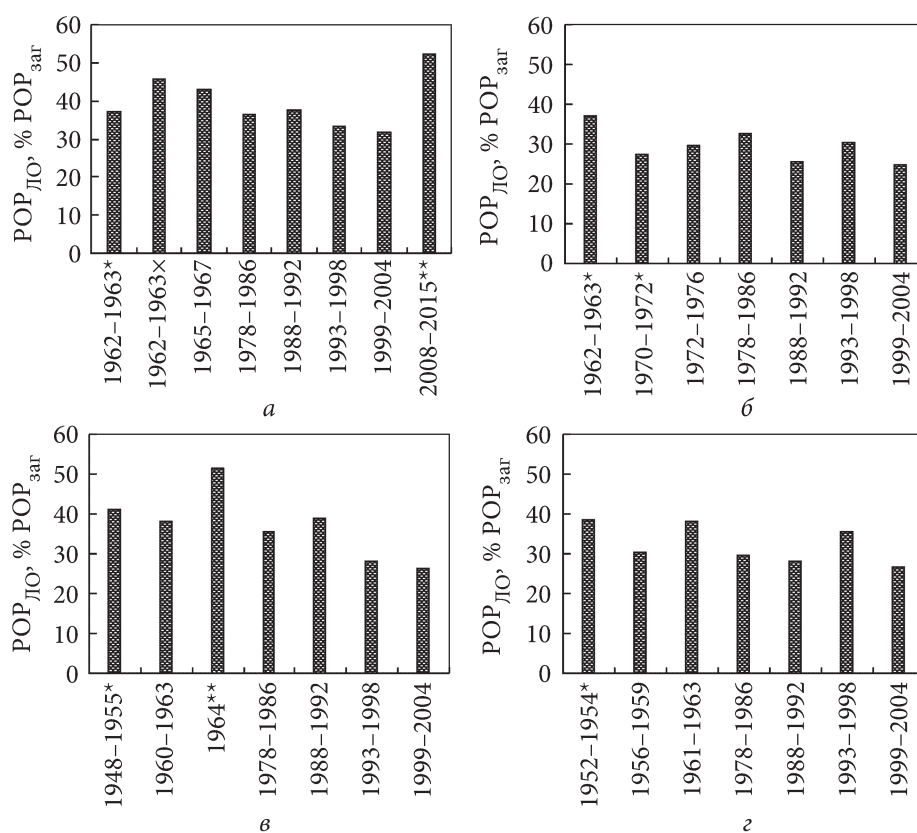


Рис. 6. Частка легкоокислюваних органічних речовин у воді водосховищ Дніпровського каскаду за усередненими показниками у різні періоди досліджень: * — верхня, середня або нижня ділянки р. Дніпро до зарегулювання стоку, × — р. Прип'ять, ** — показники взято з [21]; зона «цвітіння» води.

вуглеводів у дніпровських водосховищах проводились у 60-х—70-х та 90-х роках минулого століття, що знайшло своє відображення в роботах [2, 6, 7, 24].

Нами узагальнено результати досліджень ГР у водосховищах Дніпровського каскаду та представлено їх у нижче наведеній таблиці 1. Дані щодо вмісту вуглеводів і білковоподібних речовин у водосховищах Дніпра наведено в таблицях 2 і 3.

Як і слід було очікувати, найбільші концентрації ГР характерні для Київського водосховища (див. табл. 1), через надходження високо кольорових вод зі стоком р. Прип'яті. Найбільше їх концентрується у Прип'ятському відрозі зазначеного водосховища, а вздовж водосховища — у його правобережній частині [8]. По мірі просування вниз по каскаду водосховищ концентрація ГР знижується, що знайшло своє відображення також у дисертаційній роботі Н.М. Осадчої [16]. Пов'язано це з адсорбцією ГР на завислих частках та їхньою седиментацією у водосховищах.

Таблиця 1

Концентрація ГР, мг С/дм³, у воді водосховищ Дніпровського каскаду за літературними даними

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
Київське водосховище, відроги						
1965—1967	3,6—7,9	5,3—20,1	3,8—18,2	2,4—10,2	2,4—20,1	[8]
Київське водосховище, основне плесо						
1965—1967	4,6—8,9	6,2—17,1	5,8—20,2	2,7—8,5	2,7—20,2	[8]
1991	×	×	$\frac{12,5-27,1}{19,2}$	$\frac{7,2-24,6}{14,9}$	$\frac{7,2-27,1}{16,9}$	[35]
1992	×	×	$\frac{7,1-19,8}{12,1}$	×	×	[35]
1995—2000	×	×	×	×	$\frac{2,2-24,3}{8,5}$	[16]
2001—2005	×	×	×	×	$\frac{2,5-15,5}{6,9}$	[16]
2008*	×	$\frac{7,2-14,3}{10,2}$	×	$\frac{8,8-16,3}{13,2}$	$\frac{7,2-16,3}{11,8}$	[15]
2010	$\frac{9,6-14,6}{12,5}$	17,9*	×	$\frac{8,6-10,3}{9,2}$	$\frac{8,6-14,6}{10,8}$	[20]
Канівське водосховище						
1995—2005	×	×	×	×	$\frac{2,8-16,3}{7,4}$	[16]
2007**	×	12,8	8,9	10,3	$\frac{8,9-12,8}{10,6}$	[15]
2012**	$\frac{5,9-7,3}{6,5}$	$\frac{7,6-8,7}{8,1}$	$\frac{13,6-15,3}{14,5}$	$\frac{6,9-7,8}{7,3}$	$\frac{5,9-15,3}{9,1}$	[20]
Кременчуцьке водосховище						
1990	×	$\frac{5,7-11,9}{8,4}$	$\frac{6,9-9,9}{8,3}$	$\frac{6,7-8,7}{7,6}$	$\frac{5,7-11,9}{8,1}$	[35]
1992	×	×	$\frac{4,6-10,8}{7,2}$	×	×	
1995—2005	×	×	×	×	$\frac{1,7-14,9}{5,8}$	[16]
Каховське водосховище						
1990	×	$\frac{2,4-6,4}{5,8}$	$\frac{2,6-7,4}{5,2}$	$\frac{2,8-8,6}{4,6}$	$\frac{2,4-8,6}{5,2}$	[35]
1991	×	×	$\frac{3,5-10,2}{8,5}$	×	×	

Продовження табл. 1

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
1992	×	×	$\frac{4,3-9,8}{6,9}$	×	×	
1995—2005	×	×	×	×	$\frac{1,7-8,4}{3,8}$	[16]

* Нижня ділянка Київського водосховища, ** верхня ділянка Канівського водосховища, × — відповідні дані відсутні.

Таблиця 2

Концентрація вуглеводів, мг/дм³, у воді водосховищ Дніпровського каскаду за літературними даними

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
Київське водосховище, відроги ⁺						
1965—1967	0,33—0,83	0,42—0,90	0,27—1,64	0,28—1,25	0,27—1,64	[8]
Київське водосховище, основне плесо ⁺						
1965—1967	0,30—1,04	0,33—1,33	0,30—1,33	0,20—1,24	0,20—1,33	[8]
Київське водосховище в цілому						
1991	×	×	$\frac{0,93-1,27}{1,09}$	$\frac{0,65-2,67}{1,66}$	$\frac{0,65-2,67}{1,38}$	[2]
1992**	$\frac{1,82-2,00}{1,89}$	$\frac{0,47-2,26}{1,34}$	$\frac{1,14-1,46}{1,43}$	$\frac{0,52-2,31}{1,17}$	$\frac{0,47-2,31}{1,46}$	[39]
1991—1994	×	×	×	×	$\frac{0,6-2,2^*}{1,34}$	[39]
2008**	×	$\frac{2,58-3,08}{2,80}$	×	$\frac{1,73-2,00}{1,87}$	$\frac{1,73-3,08}{2,35}$	[15]
2010**	$\frac{1,48-1,60}{1,53}$	1,82	×	$\frac{1,35-1,88}{1,58}$	$\frac{1,35-1,88}{1,56}$	[20]
Канівське водосховище						
2007***	×	×	×	×	$\frac{1,25-2,65}{1,88}$	[15]
2013***	1,10—1,26	2,04—2,46	3,00—3,84	2,28—2,57	$\frac{1,10-3,84}{2,32}$	[18]
Кременчуцьке водосховище						
1990	×	$\frac{0,31-1,33}{0,79}$	$\frac{0,81-1,06}{0,87}$	$\frac{0,34-0,73}{0,51}$	$\frac{0,31-1,33}{0,72}$	[2]

Продовження табл. 2

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
1992	×	×	$\frac{0,54-1,28}{0,70}$	×	×	
Каховське водосховище						
1990	×	$\frac{0,38-0,94}{0,68}$	$\frac{0,49-1,67}{0,84}$	$\frac{0,33-0,56}{0,41}$	$\frac{0,33-1,67}{0,64}$	[2]
1992	×	×	$\frac{0,59-1,32}{0,99}$	×	×	

* Літньо-осіння пора, ** нижній б'єф Київського водосховища, *** верхня ділянка Канівського водосховища, + — йдеться про вміст у воді редукованих сахарів, × — відповідні дані відсутні.

Таблиця 3

Концентрація білковоподібних речовин, мг/дм³, у воді водосховищ Дніпровського каскаду за літературними даними

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
Київське водосховище						
1973	×	$\frac{0,18-0,38}{0,28}$	$\frac{0,37-0,72}{0,52}$	$\frac{0,64-0,85}{0,74}$	$\frac{0,18-0,85}{1,38}$	[33]
1978	×	×	$\frac{0,30-0,74}{0,52}$	$\frac{0,64-0,90}{0,77}$	$\frac{0,30-0,90}{0,64}$	
1991	×	×	$\frac{0,26-0,86}{0,54}$	$\frac{0,23-0,68}{0,45}$	$\frac{0,23-0,86}{0,50}$	
1992**	$\frac{0,41-0,66}{0,52}$	$\frac{0,35-0,69}{0,48}$	$\frac{0,47-0,69}{0,60}$	$\frac{0,64-0,68}{0,66}$	$\frac{0,35-0,69}{0,57}$	[39]
1991—1994	×	×	×	×	$\frac{0,3-1,2^*}{0,60}$	[39]
2008**	×	$\frac{0,72-0,90}{0,79}$	×	$\frac{0,60-0,70}{0,65}$	$\frac{0,60-0,90}{0,72}$	[15]
2010**	$\frac{0,41-0,85}{0,57}$	0,66	×	$\frac{0,40-0,62}{0,47}$	$\frac{0,40-0,85}{0,53}$	[20]
Канівське водосховище						
2007***	×	×	×	×	$\frac{0,40-0,63}{0,46}$	[15]
2012***	0,31—0,36	0,32—0,43	0,49—0,55	0,32—0,34	$\frac{0,31-0,55}{0,39}$	[20]

Продовження табл. 3

Роки	Зима	Весна	Літо	Осінь	Загалом	Література
2013***	0,35—0,37	0,47—0,50	0,63—0,84	0,54—0,59	$\frac{0,35-0,84}{0,54}$	[18]
Кременчуцьке водосховище						
1974	×	$\frac{0,59-0,65}{0,61}$	$\frac{0,36-0,85}{0,57}$	$\frac{0,29-0,67}{0,49}$	$\frac{0,29-0,85}{0,56}$	[33]
1978	×	$\frac{0,59-0,64}{0,60}$	$\frac{0,28-0,85}{0,51}$	$\frac{0,51-0,52}{0,51}$	$\frac{0,28-0,85}{0,54}$	
1990	×	$\frac{0,15-0,56}{0,42}$	$\frac{0,65-0,98}{0,77}$	$\frac{0,60-1,41}{0,91}$	$\frac{0,15-1,41}{0,70}$	
1992	×	×	$\frac{0,31-0,62}{0,45}$	×	×	
Каховське водосховище						
1978	×	×	×	$\frac{0,54-0,70}{0,64}$	×	[33]
1991	×	×	$\frac{0,18-0,74}{0,53}$	×	×	
1992	×	×	$\frac{0,64-1,07}{0,94}$	×	×	

* Літньо-осіння пора, ** нижній б'єф Київського водосховища, *** верхня ділянка Канівського водосховища, × — відповідні дані відсутні.

Як зазначалось вище, концентрація вуглеводів у поверхневих водних об'єктах значною мірою залежить від інтенсивності розвитку фітопланктону, вищої водної рослинності тощо. У водосховищах Дніпровського каскаду, зокрема у Київському і Канівському, максимальна концентрація вуглеводів у весняно-літню пору року досягала 3,08—3,84 мг/дм³ (див. табл. 2). Цікаві дані щодо вмісту редукованих сахарів наведено в роботі [7]. В ній показано, що влітку 1968 р. усереднена концентрація зазначених речовин у воді водосховищ Дніпровського каскаду становила: у Київському водосховищі — 1,23 мг/дм³, у Кременчуцькому — 2,49, у Дніпродзержинському (тепер Кам'янське) — 2,14, у Запорізькому (тепер Дніпровське) — 1,49, у Каховському — 2,62 мг/дм³. Найбільш біопродуктивними виявились Кременчуцьке і Каховське водосховища. Звичайно, це лише частина вуглеводів, яка, найвірогідніше, не враховує вміст у воді полісахаридів, тому загальний їхній вміст, напевно, значно вищий. Про це можна судити на підставі даних про загальний вміст вуглеводів (0,65—8,76 мг/дм³) у воді Київського і Кременчуцького водосховищ, отриманих у 1980 р. [24]. Він істотним чином залежав від розвитку фітопланктону.

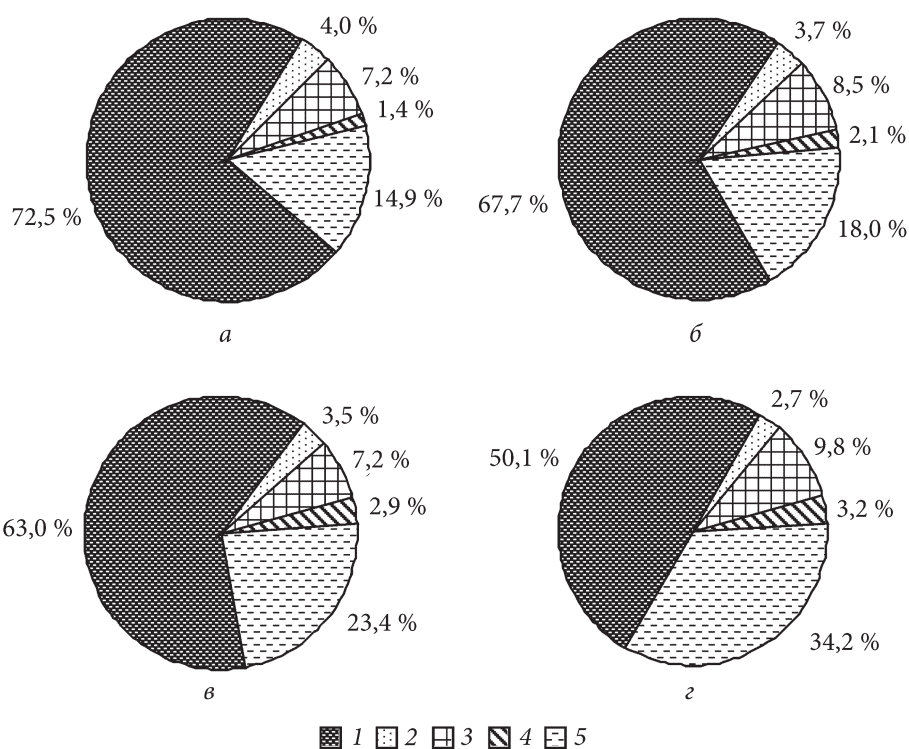


Рис. 7. Частка різних груп природних органічних речовин у загальному балансі РОР водосховищ Дніпра: 1, 2, 3, 4, 5 — відповідно частка ФК, ГК, вуглеводів, БПР та інших органічних речовин

Високі концентрації були у місцях масового розвитку водоростей і вітрових нагонів їхньої біомаси. Максимальний вміст вуглеводів у цих водосховищах досягав 14 % загального вмісту РОР.

Що ж стосується БПР, то їхня концентрація значно нижча і наближається лише до 1,0 мг/дм³, рідко перевищуючи цю величину (див. табл. 3). Найвірогідніше, це пов'язано з нестійкістю цих органічних речовин та швидкою їхньою деструкцією, зокрема в літньо-осінню пору року [23].

Нами проведено розрахунки, що стосуються частки ГР (гумінових і фульвокислот), вуглеводів та БПР у загальному балансі РОР водосховищ Дніпровського каскаду, які наведено вище (рис. 7).

Найбільша частка ГР у загальному балансі РОР притаманна Київському водосховищу і становить, за результатами наших розрахунків, у середньому 76,5 %. Відповідно, у Канівському водосховищі вона не перевищує 71,4 %, а в Кременчуцькому і Каховському водосховищах складає 66,5 і 52,8 %. Виходячи з результатів досліджень Н.М. Осадчої [16], можна констатувати, що тенденція у змінах частки ГР у загальному балансі РОР виявилась такою ж самою, тобто вниз по каскаду вона істотно знижується — з 70 % у Київському водосховищі до 64, 56 та 41 % відповідно у

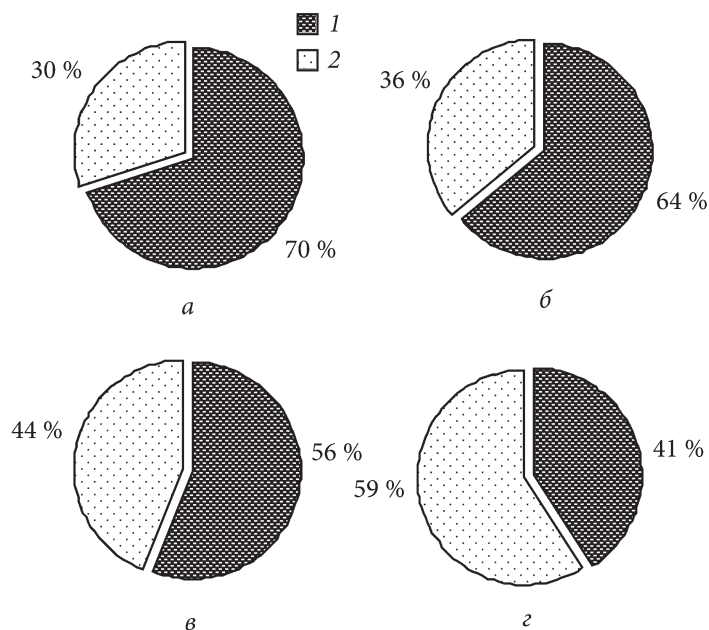


Рис. 8. Частка гумусових речовин (за результатами досліджень [16]) у загальному балансі РОР водосховищ Дніпровського каскаду за усередненими показниками: 1 — ГР, 2 — інші ОР

Канівському, Кременчуцькому і Каховському водосховищах. Проте наявна незначна різниця в отриманих нами і Н.М. Осадчою результатах, що можна бачити з наведених даних на рисунку 8.

За усередненими показниками, частка вуглеводів у досліджуваних водосховищах становить від 7,2 до 9,8 % від загальної концентрації РОР. Частка БПР, як було вже зазначено, виявилась найменшою і змінюється в межах від 1,4 % (Київське водосховище) до 3,2 % (Каховське водосховище). На інші органічні речовини, які нами не досліджувались, припадає від 14,9 % (Київське водосховище) до 34,2 % (Кременчуцьке водосховище). Хоча в окремі періоди існування водосховищ Дніпровського каскаду частки зазначених груп органічних речовин були більшими. Особливо в періоди масового розвитку синьозелених водоростей, про що вже йшлося вище.

Висновки

Отже, узагальнення результатів багаторічних досліджень органічних речовин у водосховищах Дніпровського каскаду дає можливість оцінити їхню динаміку на різних етапах їхнього функціонування. Варто зазначити, що концентрація органічних речовин у водосховищах завжди була більшою порівняно з їхнім вмістом у воді річок, які впадають у водосховища.

Аналіз показує, що у перші роки існування концентрація органічних речовин істотно зростала внаслідок їхнього вилучення з ґрунтів ложа водосховищ та рослинності, яка була затоплена. Тому у цей період формування органічних речовин відбувалось за рахунок їхнього привнесення як зі стоком річок, так і внаслідок внутрішньоводоймних процесів, зокрема вилуговування з ґрунтів ложа водосховищ та розкладання відмерлих решток рослинних і тваринних організмів.

У подальшому істотний вплив на формування органічних речовин дніпровських водосховищ виявляв інтенсивний розвиток фітопланктону, оскільки у водосховищах було достатньо поживних речовин, зокрема сполук нітрогену і фосфору, щоб спричинився «спалах» цвітіння води синьозеленими водоростями. Характерно, що по мірі зниження інтенсивності розвитку фітопланктону концентрація органічних речовин почала знижуватись. Найпомітнішим це стало у 90-х роках минулого століття.

Формування органічних речовин у Київському водосховищі відбувається головним чином за рахунок їхнього привнесення зі стоком верхнього Дніпра і Прип'яті. Певна частина утворюється внаслідок внутрішньоводоймних процесів. На формування органічних речовин нижче розташованих водосховищ впливають вище розташовані водойми, з яких вони надходять, та їхнє утворення в самих водосховищах залежно від біопродуктивності останніх.

Частка легкоокиснюваних органічних речовин у водосховищах змінювалась залежно від етапів їхнього існування. Зазвичай, вона була більшою на першому етапі після заповнення водосховищ водою, потім дещо знижувалась на етапах стабілізації.

Провідну роль у формуванні розчинених органічних речовин відіграють гумусові речовини як найбільш поширена група у їхньому складі. Найбільша частка гумусових речовин у загальному балансі РОР припадає на верхні водосховища Дніпровського каскаду — Київське та Канівське. Вниз по каскаду вона знижується, що зумовлено адсорбцією на завислих частинках та седиментацією останніх в умовах уповільнення течії.

Частка вуглеводів та білковоподібних речовин у загальному балансі РОР значною мірою залежить від інтенсивності розвитку фітопланктону та вищої водної рослинності. В періоди масового розвитку водоростей («цвітіння» води) вона зростала, а по мірі зниження цього процесу зменшувалась.

В умовах кліматичних змін слід очікувати певних трансформацій у хімічному складі води дніпровських водосховищ, оскільки цілком вірогідне посилення явища евтрофування зі зростанням концентрацій біогенних речовин, зокрема сполук нітрогену і фосфору [31]. За таких обставин слід очікувати збільшення частки автохтонних органічних речовин у загальному балансі РОР. Збільшення або зменшення кількості опадів також впливатиме на формування органічних речовин, з огляду на їхнє привнесення зі стоком річок. В літньо-осінній період, з підвищенням температури та настанням тривалої сонячної радіації посилюватиметься трансформація органічних речовин, причому це стосуватиметься не лише таких, як вуглеводи та білковоподібні речовини, але й гумусових речо-

вин. Внаслідок цієї трансформації відбуватиметься зростання частки низькомолекулярних сполук, які ставатимуть біодоступними та здатними до асиміляції гідробіотою. Основну роль у трансформації вуглеводів та сполук білкової природи відіграватиме мікробіологічна активність, тоді як гумусових речовин — фотохімічні процеси. Кількісно оцінити ці трансформації доволі складно на сучасному етапі, оскільки необхідні спеціальні дослідження як в лабораторних, так і у натурних умовах. Тим не менше, на цьому слід акцентувати увагу спеціалістів різного профілю (гідрологів, гідробіологів, гідрохіміків, фізіологів та біохіміків) вже тепер.

Список використаної літератури

1. Алмазов А.М., Денисова А.И., Майстренко Ю.Г., Нахшина Е.П. Гидрохимия Днепра, его водохранилищ и притоков. Киев : Наук. думка, 1967. 316 с.
2. Васильчук Т.А., Линник П.Н. Углеводы в воде днепровских водохранилищ. *Гидробиол. журн.* 1996. Т. 32, № 2. С. 99—104.
3. Дебейко Е.В., Рябов А.К., Набиванец Б.И. Прямое фотометрическое определение растворимых белков в природных водах. *Там же.* 1973. Т. 9, № 6. С. 109—113.
4. Денисова А.И. Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. Киев : Наук. думка, 1979. 292 с.
5. Денисова А.И., Тимченко В.М., Нахшина Е.П. и др. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. Киев : Наук. думка, 1989. 216 с.
6. Енаки Г.А. Компонентный состав органического вещества Киевского водохранилища в первые годы становления : Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Киев, 1969. 22 с.
7. Енаки Г.А. О компонентном составе органического вещества вод днепровских водохранилищ. *Гидробиол. журн.* 1972. Т. 8, № 1. С. 26—31.
8. Киевское водохранилище: Гидрохимия, биология, продуктивность / под ред. Я.Я. Цееба и Ю.Г. Майстренко. Киев : Наук. думка, 1972. 460 с.
9. Линник П.Н. Формирование гидрохимического режима водохранилищ. Гидроэнергетика и окружающая среда / под общ. ред. Ю. Ландау, Л. Сиренко. Киев: Либра, 2004. С. 219—236.
10. Линник П.Н., Жежеря В.А., Жежеря Т.П. Особенности гидрохимического режима водоемов урбанизированной территории в летний период: I. Биогенные и органические вещества. *Экологическая химия.* 2021. Т. 30, № 2. С. 71—84.
11. Линник П.Н., Журавлева Л.А., Самойленко В.Н., Набиванец Ю.Б. Влияние режима эксплуатации на качество воды днепровских водохранилищ и устьевой области Днепра. *Гидробиол. журн.* 1993. Т. 29, № 1. С. 86—98.
12. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. 270 с.
13. Майстренко Ю.Г. Органическое вещество воды и донных отложений рек и водоемов Украины (бассейны Днепра и Дуная). Киев : Наук думка, 1965. 240 с.
14. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ : Логос, 2006. 408 с.
15. Міграційні процеси неорганічних і органічних речовин у абіотичних компонентах водних екосистем за умов дії аеробних і анаеробних чинників середовища / звіт про НДР за темою № 100 (заключний). П.М. Линник, Т.О. Васильчук, А.О. Морозова та ін. Інститут гідробіології НАН України. № держреєстрації 0107U000791. Київ, 2009. 185 с.
16. Осадча Н.М. Закономірності міграції гумусових речовин у поверхневих водах України. Дис. ... докт. геогр. наук. Київ, 2011. 620 с.

17. Осадчий В.І., Набиванець Б.Й., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Гідрохімічний довідник: Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу. Київ : Ніка-Центр, 2008. 656 с.
18. Особливості формування гідрохімічного режиму водних об'єктів різного типу за екстремальної дії абіотичних чинників середовища / звіт про НДР за темою № 121 (заключний). П.М. Линник, А.О. Морозова, В.П. Осипенко та ін. Інститут гідробіології НАН України. № держреєстрації 0113U000022. Київ, 2015. 220 с.
19. Попович Г.М. Сорбционное концентрирование и спектрофотометрическое определение гуминовых и фульвокислот в водах : Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Киев, 1990. 23 с.
20. Роль гумусових речовин у процесах міграції металів і біогенних елементів та формуванні якості водного середовища поверхневих водойм різного типу / звіт про НДР за темою № 109 (заключний). П.М. Линник, Т.О. Васильчук, А.О. Морозова та ін. Інститут гідробіології НАН України. № держреєстрації 0110U002114. Київ, 2012. 211 с.
21. Романенко В.Д., Якушин В.М., Щербак В.М. та ін. Біорізноманіття та біоресурсний потенціал екосистем дніпровських водосховищ в умовах кліматичних змін і розвитку біологічної інвазії. Київ : Наук. думка, 2019. 256 с.
22. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. А.Д. Семенова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 542 с.
23. Рябов А.К., Набиванець Б.И., Олейник Г.Н. и др. Экспериментальное исследование влияния температуры и степени кислородного насыщения на скорость деструкции растворимых белков в природных водах. *Гидробиол. журн.* 1974. Т. 10, № 5. С. 15—24.
24. Сакевич А.И. Экзометаболизм пресноводных водорослей. Киев : Наук. думка, 1985. 200 с.
25. Сакевич О.Й., Усенко О.М. Алелопатія в гідроекосистемах. Київ : Логос, 2008. 343 с.
26. Сиренко Л.А., Козицкая В.Н. Биологически активные вещества водорослей и качество воды. Киев : Наук. думка, 1988. 256 с.
27. Тімченко В.М., Линник П.М., Холодько О.П. та ін. Абіотичні компоненти екосистеми Київського водосховища. Київ : Логос, 2013. 60 с.
28. Anesio A.M., Granéli W., Aiken G.R. et al. Effect of humic substance photodegradation on bacterial growth and respiration in lake water. *Appl. Environ. Microbiol.* 2005. Vol. 71, N 10. P. 6267—6275.
29. Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter. Ed. by Findlay S.E.G., Sinsabaugh R.L. San Diego: Acad. Press, 2003. 512 p.
30. Berman T., Bronk D.A. Dissolved organic nitrogen: a dynamic participant in aquatic ecosystems. *Aquat. Microb. Ecol.* 2003. Vol. 31. P. 279—305.
31. Linnik P.M. Climate changes as an important factor of the formation of the chemical composition of surface waters at the present time (a review). *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, N 1. P. 78—94.
32. Linnik P.N., Ivanechko Ya.S., Linnik R.P., Zhezherya V.A. Humic substances in surface waters of the Ukraine. *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 83, No.13. P. 2715—2730.
33. Linnik P.N., Vasil'chuk T.A. Nitrogenous organic matter in the water of the Dnieper reservoirs. *Hydrobiol. J.* 1997. Vol. 33, N 5. P. 22—29.
34. Linnik P.N., Vasilchuk T.A. Role of humic substances in the complexation and detoxification of heavy metals: case study of the Dnieper reservoirs. Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice. Perminova I.V., Hatfield K., and Hertkorn N., Eds. NATO Sci. Ser. IV: Earth and Environ. Ser. Dordrecht: Springer, 2005. Vol. 52. P. 135—154.
35. Linnik P.N., Vasil'chuk T.A., Bolelaya N.V. Humic substances in the water of the Dnieper reservoirs. *Hydrobiol. J.* 1997. Vol. 33, N 1—3. P. 66—73.
36. Linnik P.N., Vasilchuk T.A., Linnik R.P. Humic substances of natural waters and their importance for aquatic ecosystems: A review. *Ibid.* 2004. Vol. 40, N 3. P. 79—101.

37. Osadchyy V., Nabyvanets B., Linnik P., Osadcha N., Nabyvanets Yu. Processes determining surface water chemistry. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 270 p.

38. Thurman E.M. Organic geochemistry of natural waters. Dordrecht (the Netherlands): Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, 1985. 516 p.

39. Vasilchuk T.A., Osipenko V.P., Yevtukh T.V. Peculiarities of migration and distribution of the main groups of organic matter in the water of the Kiev reservoir depending on the oxygen regime. *Hydrobiol. J.* 2011. Vol. 47, N 2. P. 97–107.

40. Zhu W.Z., Yang G.P., Zhang H.H. Photochemical behaviour of dissolved and colloidal organic matter in estuarine and oceanic waters. *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 607–608. P. 214–224.

Надійшла 02.07.2021

P.M. Linnik, Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Geroyiv Staligrada Ave, Kyiv, 04210, Ukraine,
e-mail: peter-linnik@ukr.net
ORCID 0000-0002-2144-4052

ORGANIC SUBSTANCES IN THE WATER OF THE DNIEPER RESERVOIRS AFTER REGULATION OF THE DNIEPER FLOW

The article is devoted to the generalization and analysis of long-term changes in the content of organic matter in the water of the Dnieper River before the regulation of its runoff and reservoirs of the Dnieper cascade after their filling and further operation. It logically continues a series of works in which the peculiarities of the dynamics of the main components of the hydrochemical regime of the river and the reservoirs built on it in different periods of research are considered. The analysis of the results of many years of research shows that in the formation of organic matter of reservoirs at different stages of their existence an important role was played by their introduction with river runoff, leaching of reservoir beds and removal of plant and animal residues, as well as production of significant quantities during periods of mass development of algae («bloom» of water). Therefore, the concentrations of organic matter increased significantly during these periods. Humic substances play a dominant role in the component composition of dissolved organic substances in the reservoirs of the Dnieper cascade, the share of which varies from 76,5 % in the water of the Kyiv reservoir to 52,8 % of the total content of dissolved organic substances in the water of the Kakhovka reservoir. During periods of intensive development of phytoplankton, the concentration of carbohydrates and protein compounds increases, and their share in the overall balance of organic matter is hence. Reducing this process causes some reduction in the concentration of organic matter in general. The generalization of the results of long-term research of organic matter in the reservoirs of the Dnieper cascade becomes especially relevant in the current conditions of reservoirs, which have passed several stages of their formation and are affected by climate change. Under such conditions, changes should be expected not only in the quantitative indicators of organic matter content in reservoirs, but also in their component composition due to transformation with increasing water temperature and intensification of microbiological activity and solar radiation.

Keywords: organic substances, Dnieper reservoirs, easily oxidizable organic substances, humic substances, carbohydrates, protein-like substances.