

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ РОСЛИН

УДК 574.5(28):581.526.3:547.587

О.М. УСЕНКО, к. б. н., ст. наук. співроб., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: oleg.mikh.usenko@gmail.com
ORCID 0000-0002-0782-7292

І.М. КОНОВЕЦЬ, к. б. н., ст. наук. співроб., зав. лабораторією,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

ВМІСТ ФЕНОЛКАРБОНОВИХ КИСЛОТ У ВОДІ СЕРЕД ЗАРОСТЕЙ ВИЩИХ ВОДНИХ РОСЛИН РІЗНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ГРУП

Досліджено якісний та кількісний склад фенолкарбонів кислот у водоймах серед заростей вищих водних рослин різних екологічних груп: повітряно-водних (*Typha angustifolia* L., *Scirpus lacustris* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), занурених (*Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L.) та з плаваючим листям (*Typha natans* L., *Najas lutea* L.). У воді, де вегетували зазначені макрофіти, виявлені такі кислоти, як бензойна, бузкова, ванілінова, галова, *p*-оксибензойна, протокатехова, α -резорцилова, β -резорцилова, саліцилова, ферулова, каваова, корична, кумарова та синапова. Їхня загальна концентрація складала: для *T. angustifolia* — 114,7 мкг/дм³, *Sc. lacustris* — 24,71, *Tr. natans* — 56,14, *N. lutea* — 19,3, *C. demersum* — 25,42—38,66 і для *M. spicatum* — 1,42—2,83 мкг/дм³. Аналіз вмісту досліджуваних сполук у воді, відібраний серед заростей *Ph. australis* протягом весняно-осіннього періоду, виявив суттєві відмінності як у співвідношенні окремих кислот, так і у їх розподілі по групах. Максимальна концентрація бензойної та саліцилової кислот у воді зареєстрована на початку вегетації *Ph. australis*, а ванілінової і галової кислот — в період його активної вегетації. Вміст коричневої та ферулової кислот був найменшим на початку вегетаційного періоду. Кластерний аналіз вмісту фенолкарбонів кислот у воді серед заростей *C. demersum* та *M. spicatum* на двох станціях спостережень (затоки Собаче Гирло і Верблюд Канівського водосховища) засвідчив наявність двох груп досліджуваних сполук. До першої групи увійшли бензойна та галова кислоти, а до другої — інші виявлені кислоти. Використання методу головних компонент (РСА) виявило тісний взаємозв'язок між якісними і кількісними показниками вмісту фенолкарбонів кислот у воді в місцях вегетації та видом вищих водних рослин. Це може бути свідченням важливої ролі вищих водних рослин у формуванні пулу цих речовин у воді.

Ц и т у в а н н я: Усенко О.М., Коновець І.М. Вміст фенолкарбонів кислот у воді серед заростей вищих водних рослин різних екологічних груп. *Гідробіол. журн.* 2023. Т. 59. № 4. С. 81—93.

ISSN 0375-8990. Гідробіологічний журнал. 2023. 59(4)

Ключові слова: фенолкарбонові кислоти, вищі водні рослини, сезонна динаміка, кластерний аналіз.

Алелопатична взаємодія гідробіонтів є широко розповсюдженим явищем, що спостерігається між представниками різних трофічних рівнів [6, 15]. Це, перш за все, форма обміну речовин і інформації за рахунок виділення метаболітів, які прямо чи опосередковано впливають на ріст і розвиток гідробіонтів [1, 35]. Взаємодія окремих компонентів у гідробіоценозах має різноспрямоване регулювання інтенсивності розвитку представників автотрофної ланки [5, 9, 30]. Розчинені у воді органічні сполуки, внаслідок притаманної багатьом водоростям фотогетеротрофії та активних механізмів транспорту, можуть посилювати їхній розвиток у природних водах [4, 13, 14, 19].

Вищі водні рослини (ВВР) відзначаються високим алелопатичним потенціалом, який проявляється навіть всередині цієї групи гідробіонтів. Так, показано, що їхня продукція при спільному зростанні за впливу метаболітів інших видів відрізняється від такої в одновидових популяціях. Зокрема, встановлено, що *Myriophyllum spicatum* пригнічує інші макрофіти, наприклад *Najas marina* [11]. В літературі наявні відомості і про те, що водні витяжки з молодих листків і кореневищ *Stratiotes aloides*, *Hippuris vulgaris*, *Hydrocharis morsus* інгібують рух хлоропластів листка елодеї, хоча з наближенням осені цей вплив слабшає [19].

Встановлено, що виділення екзометаболітів ВВР залежить від біотичних та абіотичних чинників. Загальною тенденцією є те, що найбільше різноманіття екзогенних метаболітів спостерігається у період активної вегетації рослин, після якого кількісні і якісні показники вмісту цих речовин знижуються [28]. Кількість і склад екзометаболітів залежать від умов мінерального живлення і фази росту ВВР. Так, наприклад, високий вміст нітратного азоту посилює інтенсивність екскреції макрофітами метаболітів у зовнішнє середовище [29], а виділення органічних кислот рослинами клітинами залежить від інтенсивності фотосинтезу, темпів розмноження і накопичення біомаси, а також інтенсивності освітлення [24, 28].

Екзогенні органічні кислоти ВВР впливають на ріст, клітинний поділ, інтенсивність та спрямованість процесів метаболізму, формування хімічного складу, якісний склад та кількість екзометаболітів водоростей.

Функціональний вплив органічних кислот на метаболізм клітин пов'язаний не тільки з їх внутрішньоклітинною трансформацією, але й з регуляцією рН у клітинах та у навколишньому водному середовищі, що зумовлює, зокрема, їхню антибактеріальну активність [7, 26].

Фенолкарбонові кислоти (ФКК), які виділяють у воду ВВР [12, 28, 31], в певній концентрації можуть гальмувати фізіологічну активність ціанобактерій, проте не пригнічувати, або навіть стимулювати, ріст зелених, діатомових та інших планктонних водоростей [9, 31]. Найбільші концентрації ФКК зареєстровано на ділянках водоймищ, зарослих вищими водними рослинами. Виявлено зворотній зв'язок між вмістом ФКК у воді та розвитком ціанобактерій [3, 30], які викликають «цвітіння» води і можуть

синтезувати сильнодіючі токсичні сполуки (альготоксини), що становлять потенційну загрозу для живих організмів та людини [17, 18, 27].

Аналіз численних матеріалів свідчить про те, що розчинені у воді метаболіти ВВР є потужним чинником, який впливає на інтенсивність розмноження та обмін речовин у водоростей, а також на формування і функціонування різних ланок гідробіоценозів в цілому [1, 32, 34]

Оскільки вищі водні рослини у водоймах є одними з основних продуцентів ФКК, для з'ясування їхнього внеску у формування пулу зазначених речовин, перш за все, необхідно встановити особливості накопичення цих сполук у місцях зростання тих чи інших макрофітів, які можуть брати активну участь у регуляції чисельності та функціонування представників альгофлори.

Метою роботи було визначення якісного та кількісного складу фенолкарбонових кислот у воді серед заростей ВВР, що належать до різних екологічних груп.

Матеріал і методика досліджень

Визначення вмісту ФКК проводили у воді, відібраній у заростях вищих водних рослин: повітряно-водних — рогозу вузьколистого (*Typha angustifolia* L.) і комишу озерного (*Scirpus lacustris* L.), занурених — куширу зануреного (*Ceratophyllum demersum* L.) і водопериці колосистої (*Myriophyllum spicatum* L.) та рослин з плаваючими листям — водяного горіха (*Trapa natans* L.) і глечиків жовтих (*Nuphar lutea* L.). Зазначені макрофіти є типовими представниками водної рослинності водосховищ Дніпра та водойм його басейну [16, 20—23]. Проби були відібрані в період активної вегетації ВВР у затоках Собаче Гирло та Верблюд (верхня частина Канівського водосховища).

Для дослідження сезонної динаміки якісного складу ФКК проби води відбирали у заростях очерету звичайного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) в прибережній частині оз. Центрального (м. Київ) на початку (травень) та під час його активної вегетації (серпень), а також наприкінці вегетаційного сезону (жовтень).

Відбір проб води проводили у місцях, де зарості формувались виключно або переважно одним видом ВВР на ділянках з низьким водообміном та відсутністю значного перемішування водних мас.

Виділення ФКК з води проводили за допомогою іонообмінних смол КУ-2 та ЭДЭ-10П [2]. Склад та кількісний вміст ФКК визначали на рідинному хроматографі Agilent 1200 з мас-детектуванням на Quadrupole 6130 в Центрі колективного користування приладами Інституту гідробіології НАН України. Хроматографічне розділення проводили на колонці Zorbax Eclipse XDB-C18 Narrow-Bore 2,1×150 мм у системі розчинників вода: ацетонітрил з додаванням 0,1% мурашиної кислоти при швидкості потоку рухомої фази 1 см³/хв, ін'єкція складала 100 мм³, джерело іонізації — ESI (+), режим детектування іонів — SIM. Для ідентифікації та кількісного визначення фенолкарбонових кислот використовували стандарти фірми Sigma-Aldrich (Німеччина).

Кластерний аналіз [10] проводили за абсолютними значеннями концентрації ФКК у воді серед заростей двох видів ВВР (*C. demersum* та *M. spicatum*) на двох різних ділянках (затоки Собаче Гирло та Верблюд). Аналіз дисперсії даних щодо вмісту ФКК проводили за допомогою методу головних компонент (PCA — Principal Component Analysis) [25].

Результати досліджень та їх обговорення

Встановлено, що загальний вміст ФКК у воді в місцях вегетації рослин різних екологічних груп коливається у широкому діапазоні (табл. 1). Так, у воді, де зростали повітряно-водні рослини, концентрація ФКК становила: для *T. angustifolia* — 114,7 мкг/дм³, для *Sc. lacustris* — 24,71 мкг/дм³; у воді серед заростей рослин з плаваючим листям: для *Tr. natans* — 56,14 мкг/дм³, для *N. lutea* — 19,3 мкг/дм³; у воді серед заростей занурених рослин: для *C. demersum* — 25,42 мкг/дм³ і для *M. spicatum* — 1,42 мкг/дм³ у затоці Собаче Гирло та відповідно 38,66 мкг/дм³ і 2,83 мкг/дм³ — у затоці Верблюд.

Найбільший вміст бензойної (94,10 мкг/дм³), ванілінової (9,03 мкг/дм³) та саліцилової (5,44 мкг/дм³) кислот був зареєстрований у воді, відібраній серед заростей *T. angustifolia*; α -резорцилової (0,31 мкг/дм³ і 0,35 мкг/дм³) — відповідно *N. lutea* та *C. demersum*, протокатехової (0,10 мкг/дм³) — *N. lutea*, *n*-оксибензойної (5,44 мкг/дм³), коричневої (2,65 мкг/дм³), кумарової (0,24 мкг/дм³), ферулової (0,44 мкг/дм³), синапової (0,18 мкг/дм³) — *Tr. natans*, кавової (0,15 мкг/дм³) — *M. spicatum*, бузкової (1,58 мкг/дм³ та 1,82 мкг/дм³) — відповідно *Tr. natans* та *C. demersum*, β -резорцилової (0,64 мкг/дм³) — *Sc. lacustris* і галової (5,52 мкг/дм³ і 12,18 мкг/дм) — відповідно *C. demersum* заток Собаче Гирло та Верблюд.

Аналіз вмісту ФКК у воді, відібраній серед заростей повітряно-водних рослин *T. angustifolia* та *Sc. lacustris* дозволив виявити такі особливості: для обох видів характерна наявність бензойної, ванілінової, галової, *n*-оксибензойної, α -резорцилової, саліцилової та коричневої кислот; у воді серед заростей *T. angustifolia* були відсутні бузкова, протокатехова, β -резорцилова, кумарова, кадова і синапова кислоти; у воді серед заростей *Sc. lacustris* не виявлені ферулова і кадова кислоти (див. табл. 1).

Щодо заростей рослин з плаваючим листям, то спільними для них виявились такі кислоти, як бензойна, бузкова, *n*-оксибензойна, α -резорцилова та ферулова (див. табл. 1).

Зразки води, відібрані в заростях занурених рослин характеризувались найбільшим різноманіттям ФКК, однак і тут спостерігались певні відмінності між двома досліджуваними видами макрофітів. Так, зокрема, у воді, де зростала *M. spicatum*, не виявлені β -резорцилова, коричнева, кумарова та синапова кислоти (див. табл. 1).

Аналіз зразків води, відібраних у місцях вегетації макрофітів з плаваючим листям, свідчить про те, що склад екзогенних ФКК лише у загальних рисах відповідає внутрішньоклітинному пулу цих речовин. Так, на

Таблиця 1

Вміст фенолкарбонових кислот у воді серед заростей деяких вищих водних рослин, мкг/дм³

Групи ФКК	ФКК	Види рослин та місця відбору проб води							
		затока Собаче Гирло				затока Верблюд			
		<i>T. angustifolia</i>	<i>Sc. lacustris</i>	<i>Tr. natans</i>	<i>N. lutea</i>	<i>C. demersum</i>	<i>M. spicatum</i>	<i>C. demersum</i>	<i>M. spicatum</i>
Оксибензоїні	Бензойна	94,10	14,66	38,13	15,04	8,65	0,92	12,33	2,10
	Бузкова	—	1,40	1,58	0,74	1,30	—	1,82	0,01
	Ванілінова	9,03	1,99	3,25	—	2,17	0,29	2,54	0,35
	Галова	2,71	2,63	—	2,92	5,52	—	12,18	0,01
	<i>n</i> -Оксибензойна	3,02	1,68	5,44	0,20	2,75	0,01	3,62	0,02
	Протокатехова	—	0,05	—	0,10	0,03	0,01	0,05	0,02
	α -Резорцилова	0,10	0,26	0,09	0,31	0,22	0,03	0,35	0,05
	β -Резорцилова	—	0,64	—	—	0,15	—	0,18	—
	Саліцилова	5,44	0,86	4,14	—	2,95	0,06	3,81	0,11
	Кавава	—	—	—	—	—	0,09	0,01	0,15
Оксикоричні	Корична	0,23	0,39	2,65	—	1,30	—	1,33	—
	Кумарова	—	0,03	0,24	—	0,08	—	0,10	—
	Синапова	—	0,12	0,18	—	0,09	—	0,10	—
	Ферулова	0,23	—	0,44	0,11	0,21	0,01	0,24	0,02
	Загальна концентрація	114,7	24,71	56,14	19,30	25,42	1,42	38,66	2,83

Примітка. «—» — не виявлено.

відміну від їхнього вмісту у фітомасі [33], переважна більшість екзогенних ФКК у воді серед заростей *Tr. natans* і *N. lutea* належить до групи оксибензойних кислот. Крім того, у воді не знайдено кількох (від 4 до 7) ФКК, які виявлені у фітомасі рослин. Це дозволяє висловити припущення, що перехід ФКК у водне середовище може бути не стільки наслідком процесу пасивної дифузії, скільки відбуватись завдяки активному транспорту цих речовин. Очевидно, ці особливості можуть відігравати певну роль у забезпеченні розширення ареалу водних рослин.

У воді в місцях вегетації *C. demersum* помітною була кількість бензойної, галової, саліцилової, *n*-оксибензойної і ванілінової кислот, які є найбільш алопатично активними. Решта ФКК містилась у невеликій кількості.

У воді серед заростей досліджених макрофітів у найбільшій кількості виявлена бензойна кислота, що відповідає особливостям внутрішньоклітинного пулу ФКК [33]. Загалом вміст оксибензойних кислот складає у середньому 97% від суми усіх виявлених кислот. Звертає також на себе увагу значний вміст ванілінової та, в меншій мірі, галової та саліцилової кислот у зразках води в місцях вегетації більшості досліджених ВВР. Серед оксибензойних ФКК, які присутні у воді в низьких кількостях, варто зазначити α - та β -резорцилову кислоти, а також ферулову. Серед оксикоричних кислот синапова була знайдена лише у воді заростей *Sc. lacustris*, *Tr. natans* і *C. demersum*. Кавова кислота була виявлена лише у заростях *M. spicatum* та, в невеликій кількості, — у заростях *C. demersum* в затоці Верблюд. Серед досліджених ВВР різних екологічних груп найширший спектр ФКК виявлено у воді в місцях вегетації *Sc. lacustris*, *Tr. natans* і *C. demersum* (рис. 1).

Незважаючи на те, що екзометаболіти вищих водних рослин відзначаються меншою кількістю та різноманіттям порівняно з внутрішньоклітинними [33], деякі представники макрофітів формують досить значний пул цих речовин у водному середовищі. Так, у місцях вегетації рослин з плаваючим листям *N. lutea* і *Tr. natans* загальний вміст ФКК відрізнявся майже втричі, у воді серед заростей повітряно-водних макрофітів *T. angustifolia* та *Sc. lacustris* — більш ніж у 4 рази, а занурених рослин *C. demersum* і *M. spicatum* — майже у 18 та 14 разів, відповідно у затоках Собаче Гирло та Верблюд.

Оскільки якісний та кількісний склад фенольних сполук значною мірою залежить від впливу різних чинників, зокрема температури і стадії розвитку рослинних організмів, певний інтерес становить з'ясування особливостей сезонної динаміки цих речовин у воді серед заростей водних рослин. Аналіз проб води, відібраної у місцях вегетації *Ph. australis* протягом весняно-осіннього періоду, дозволив ідентифікувати низку ФКК, а саме: бензойну, саліцилову, *n*-оксибензойну, ванілінову, галову, кавову, коричну та ферулову (рис. 2). При цьому були зафіксовані суттєві відмінності як у співвідношенні окремих кислот, так і у їхньому розподілі по групах. Так, частка оксибензойних кислот (галова, *n*-оксибензойна, ванілінова, бензойна і саліцилова) складала 82,3—95,1%. Відносний вміст

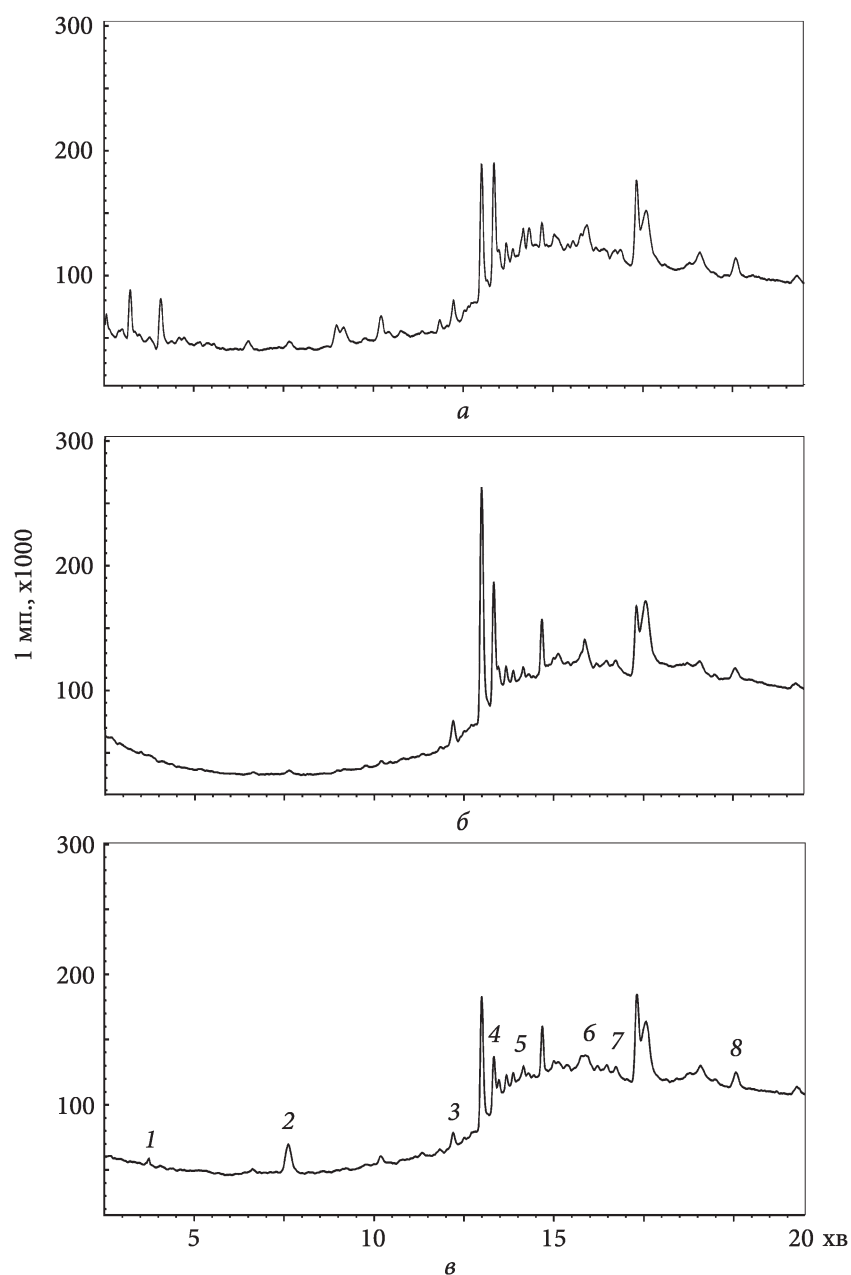


Рис. 1. Хроматограма комплексу фенолкарбонових кислот у воді серед заростей *Sc. lacustris* (а), *Tr. natans* (б) і *C. demersum* (в): 1 — галова; 2 — протокатехова; 3 — *п*-оксибензойна; 4 — ванілінова; 5 — бузкова; 6 — бензойна; 7 — саліцилова; 8 — корична

оксикоричних кислот (кавова, ферулова, корична) був значно нижчим і найпомітніше змінювався під час активної вегетації *Ph. australis* та наприкінці вегетаційного періоду.

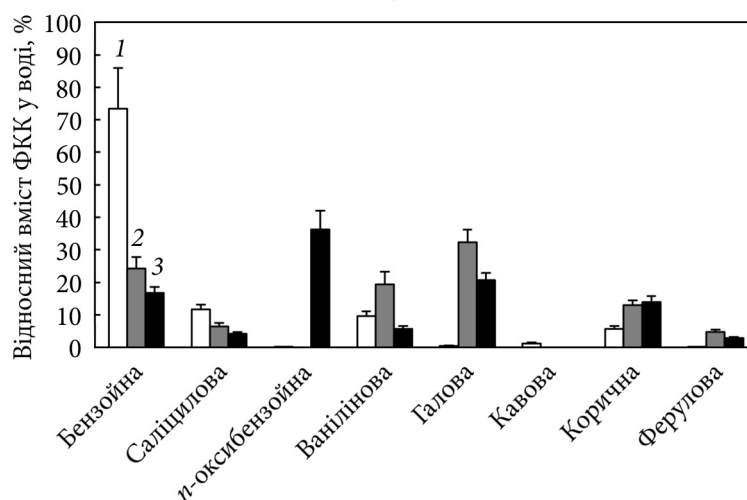


Рис. 2. Відносний вміст (%) фенолкарбонових кислот у воді серед заростей *Ph. australis*: 1 — на початку вегетації (травень); 2 — під час активної вегетації (серпень); 3 — наприкінці вегетаційного сезону (жовтень)

Щодо змін вмісту окремих кислот, то варто звернути увагу на той факт, що для бензойної кислоти він був найбільшим на початку розвитку *Ph. australis*, з подальшим зниженням до завершення вегетаційного періоду. Подібна динаміка відмічена і для вмісту саліцилової кислоти (див. рис. 2).

Інша картина спостерігалась при аналізі динаміки вмісту ванілінової та галової кислот. Так, їхня максимальна кількість зафіксована у воді в період активної вегетації *Ph. australis*, а *n*-оксибензойна кислота реєструвалась тільки в кінці вегетаційного періоду. На противагу оксибензойним, вміст ФКК із групи оксикоричних (корична та ферулова) був найменшим на початку вегетаційного періоду.

Така динаміка накопичення ФКК дозволяє припустити, що оксикоричні кислоти можуть відігравати більш важливу роль в алелопатичних взаємовідносинах рослин, ніж оксибензойні, які, швидше за все, є активними «алелохеміками» за більш високого вмісту у воді. Проте це припущення потребує поглибленого дослідження в подальшому.

Порівняння особливостей накопичення ФКК у воді у місцях вегетації *S. demersum* та *M. spicatum* в затоках Собаче Гирло та Верблюд показало, що в останньому випадку спостерігався дещо більший вміст зазначених сполук (див. табл. 1), що може бути пов'язано з гідрологічними особливостями досліджуваних ділянок Канівського водосховища. Аналіз абсолютних значень концентрації ФКК виявив два великі кластери, один з яких складається з двох досить помітних підкластерів (рис. 3).

В групу ФКК, що характеризуються найбільшими концентраціями у воді серед заростей *S. demersum* та *M. spicatum*, увійшли бензойна та галова кислоти, які є алелопатично активними і належать до оксибензойних

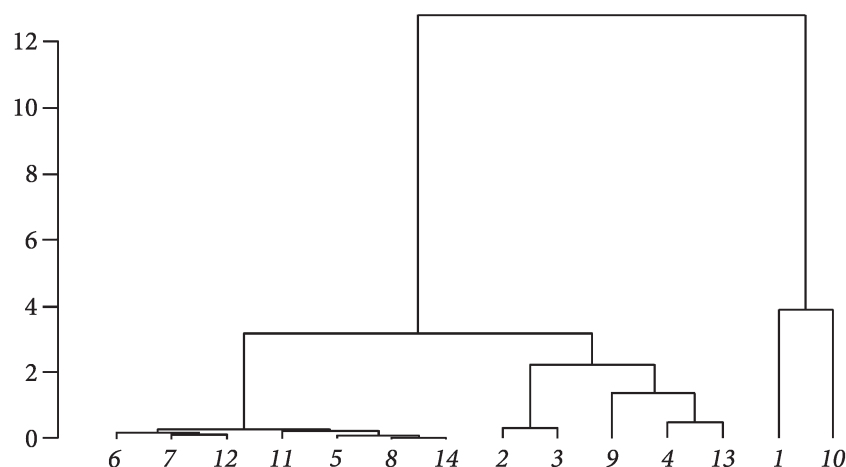


Рис. 3. Кластерний аналіз ФКК за абсолютними значеннями їхньої концентрації у воді: 1 — бензойна; 2 — *n*-оксибензойна; 3 — саліцилова; 4 — корична; 5 — протокатехова; 6 — α -резорцилова; 7 — α -резорцилова; 8 — кумарова; 9 — ванілінова; 10 — галова; 11 — кавова; 12 — ферулова; 13 — бузкова; 14 — синапова

кислот. У другу за величинами концентрацій групу увійшли п'ять ФКК з тісними зв'язками між *n*-оксибензойною та саліциловою кислотами, а також ваніліновою, коричнею і бузковою кислотами. Слід зазначити, що інша частина ФКК, які належать до різних груп і виявлені у значно менших концентраціях, щільно кластеризована. Вони розділені на два підкластери (перший — α -резорцилова, α -резорцилова та ферулова; другий — кавова, протокатехова, кумарова та синапова кислоти). До першого підкластеру входить дві оксибензойні кислоти та одна оксикорична, а до другого — три оксикоричні та одна оксибензойна.

Аналіз даних щодо вмісту ФКК у воді серед заростей *C. demersum* та *M. spicatum* досліджуваних водних об'єктів виявив тісний взаємозв'язок між якісними і кількісними показниками цих речовин у воді та видом ВВР, який формує такі зарості, на протипагу просторовій приналежності точок спостереження. Це може свідчити про важливу роль вищих водних рослин у формуванні пулу ФКК у воді (рис. 4).

Наявність серед виявлених ФКК алелопатично активних сполук дає можливість досліджуваним рослинам активно конкурувати з іншими видами при освоєнні нових ареалів. Однією з передумов формування угруповань ВВР є спорідненість у функціонуванні каталітичних систем та наявність єдиних поліфункціональних проміжних метаболітів, що створює сприятливі умови для координованої взаємодії між видами. Активація відносно невеликої кількості неспецифічних сигнальних систем дозволяє їм домінувати на окремих ділянках водойм [8].

Отже, проведені дослідження екзогенних ФКК в місцях вегетації ВВР у прісноводних водоймах показали, що кількість і співвідношення цих

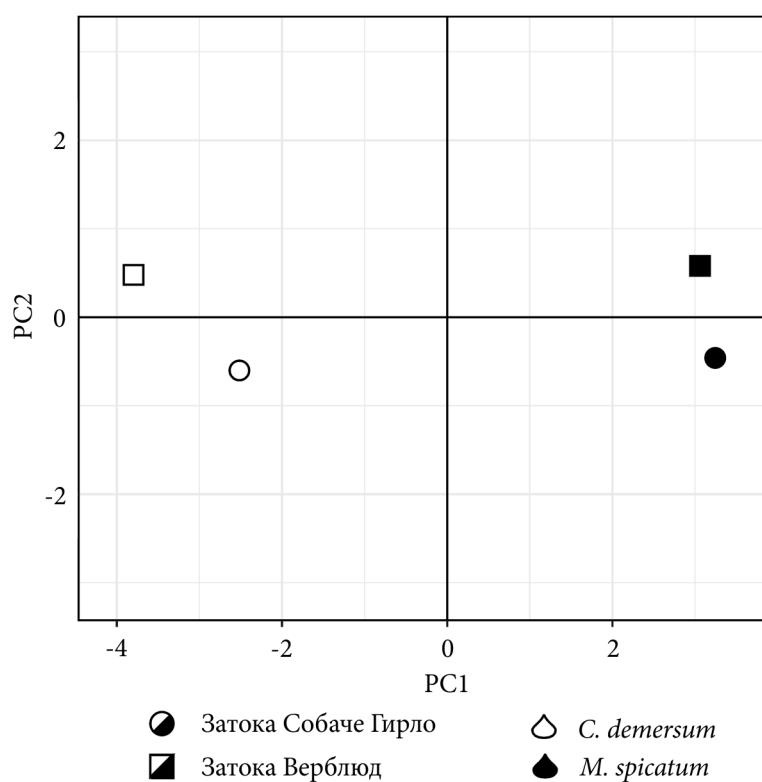


Рис. 4. Аналіз дисперсії даних щодо вмісту фенолкарбонових кислот у воді серед заростей *C. demersum* та *M. spicatum* за допомогою методу головних компонент

сполук залежать від виду рослини, сезону року, а також просторового розміщення заростей.

Висновки

В результаті проведених досліджень води, відібраної серед заростей шести видів вищих водних рослин різних екологічних груп (*T. angustifolia*, *Sc. lacustris*, *Tr. natans*, *N. lutea*, *C. demersum* та *M. spicatum*) виявлено 14 ФКК, а саме: бензойну, бузкову, ванілінову, галову, п-оксибензойну, протокатехову, α - та β -резорцилову, саліцилову, ферулову, кавову, коричну, кумарову та синапову.

У воді серед заростей *T. angustifolia* сумарна концентрація ФКК становила 114,7 мкг/дм³, *Sc. lacustris* — 24,71, *Tr. natans* — 56,14, *N. lutea* — 19,3, *C. demersum* — 25,42 і 38,66 і *M. spicatum* — 1,42 і 2,83 мкг/дм³. Найпомітнішою була різниця для видів, які належать до груп занурених та повітряно-водних рослин.

Встановлено, що вміст розчинених ФКК у місцях вегетації *Ph. australis* суттєво змінюється протягом вегетаційного періоду. Серед виявлених сполук кількісну перевагу (від 82,3 до 95,1%) мали кислоти, які належать

до групи оксибензойних (бензойна, *n*-оксибензойна, ванілінова, галова, саліцилова). Відносний вміст оксикоричних кислот (кавова, ферулова, корична) значно нижчий і помітно змінювався як під час активної вегетації *Ph. australis*, так і наприкінці вегетаційного періоду.

За результатами кластерного аналізу виявлено групу ФКК, що характеризується найбільшими концентраціями у воді серед заростей *C. detersum* та *M. spicatum* на двох станціях відбору проб води — затоки Собаче Гирло і Верблюд. До першої групи увійшли бензойна та галова кислоти, які належать до оксибензойних кислот. Друга група представлена іншими кислотами з тісними зв'язками між *n*-оксибензойною та саліциловою, а також ваніліною, коричною і бузковою кислотами.

Аналіз отриманих даних за допомогою методу головних компонент виявив тісний взаємозв'язок між якісними і кількісними показниками вмісту ФКК у воді серед заростей та домінантним видом ВВР. Це може бути свідченням провідної ролі вищих водних рослин у формуванні пулу цих речовин у воді.

Виявлені особливості вмісту ФКК у воді, очевидно, пов'язані як з метаболічними особливостями їхніх продуцентів, так і з процесами хімічної та мікробіологічної трансформації органічних речовин у водному середовищі, що потребує подальшого детального вивчення.

Список використаної літератури

1. Метейко Т.Я. Метаболиты высших водных растений и их роль в гидробиоценозах (обзор). *Гидробиол. журн.* 1981. Т. 17, № 4. С. 3—12.
2. Патент № 109838 МПК 9 В 01 D 15/30, 15/32, G 01N 33/18, Україна. Спосіб визначення якісного і кількісного складу фенолкарбонових кислот у воді за допомогою хромато-мас-спектрофотометра / Усенко О.М., Коновець І.М., заявник та патентовласник Інститут гідробіології НАН України; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.
3. Романенко В.Д., Сакевич О.Й., Усенко О.М. Вищі водяні рослини як чинник обмеження «цвітіння» води ціанобактеріями. *Доп. НАН України*. 2005. № 8. С. 174—177.
4. Сакевич А.И. Экзометаболиты пресноводных водорослей. Киев : Наук. думка. 1985. 200 с.
5. Сакевич А.И. Выделение и реассимиляция метаболитов водорослей. *Альгология*. 1998. № 2. С. 178—186.
6. Сакевич О.Й., Усенко О.М. Алелопатія в гідроекосистемах. Київ : Логос, 2008. 344 с.
7. Сиренко Л.А., Козицкая В.Н. Биологически активные вещества водорослей и качество воды. Киев : Наук. думка, 1988. 254 с.
8. Тарчевский И.А. Сигнальные системы клеток растений. Москва : Наука, 2002. 294 с.
9. Усенко О.М., Сакевич О.Й., Баланда О.В. Резистентність водоростей до біологічно активних речовин. Київ : Логос. 2010. 192 с.
10. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. / Под ред. И.С. Енюкова. Москва : Финансы и статистика, 1989. 215 с.
11. Adami M., Waisel G. Inter-relationships between *Najas marina* L. and three other species of aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*. 1985. Vol. 126, N 2. P. 169—173.

12. Anku W.W., Mamo M.A., Govender P.P. Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods. *Phenolic compounds* / Ed. M. Soto-Hernandez. 2017. 456 p.
13. Bonin D.J., Maestrini S.Y. Importance of organic nutrients for phytoplankton growth in natural environments: implications for algal species succession. *Can. Bull. Fish. and Aquat. Sci.* 1981. N 210. P. 279—291.
14. Camacho R.F., Martinez S.M.E., Sánchez W.S. Influencia del pH en el crecimiento heterotrófico de *Chlorella pyrenoidosa*. *Afimdad*. 1988. Vol. 45, N 418. P. 497—502.
15. Chetsumon A., Umeda F., Maeda I. et al. Broad spectrum and mode of action of an antibiotic produced by *Scytonema* sp. TISTR 8208 in a seaweed-type bioreactor. *Appl. Biochem. Biotech.* 1998. N 70. P. 249—256.
16. Ivanova I.Yu., Kharchenko G.V., Klochenko P.D. Higher aquatic vegetation of water bodies of the town of Kiev. *Hydrobiol. J.* 2007. Vol. 43, N 3. P. 36—56.
17. Kirpenko N.I., Krot Yu.G., Usenko O.M. Surface waters «blooms» — fundamental and applied aspects. *Ibid.* 2019. Vol. 55, N 2. P. 18—30.
18. Kirpenko N.I., Krot Yu.G., Usenko O.M. Toxicological aspects of the surface water «blooms» (a review). *Ibid.* 2020. Vol. 56, N 2. P. 3—16.
19. Kirpenko N.I., Usenko O.M. Influence of higher aquatic plants on microalgae (a review). *Ibid.* 2013. Vol. 49, N 2. P. 57—74.
20. Klochenko P.D., Shevchenko T.F. Phytoepiphyton of macrophytes of various ecological groups of the Kiev Reservoir. *Ibid.* 2016. Vol. 52, N 6. P. 3—16.
21. Klochenko P., Shevchenko T. Distribution of epiphytic algae on macrophytes of various ecological groups (the case study of water bodies in the Dnieper River basin). *Oceanol. Hydrobiol. St.* 2017. Vol. 46, Iss. 3. P. 283—293.
22. Klochenko P.D., Shevchenko T.F., Tarashchuk O.S. Phytoepiphyton of the additional net of the Kanev Reservoir. *Hydrobiol. J.* 2016. Vol. 52, N 3. P. 22—37.
23. Klochenko P.D., Shevchenko T.F., Vasilchuk T.A. et al. On the ecology of phytoepiphyton of water bodies of the Dnieper River basin. *Hydrobiol. J.* 2014. Vol. 50, N 3. P. 41—54.
24. Kolada A. The use of aquatic vegetation in lake assessment: Testing the sensitivity of macrophyte metrics to anthropogenic pressures and water quality. *Hydrobiologia*. 2010. Vol. 656, N 1. P. 133—147.
25. Metsalu T., Vilo J. ClustVis: A web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. *Nucleic Acids Research*. 2015. Vol. 43 (W1). P. 566—570.
26. Mitova M., Tascova R., Popov S. et al. GC/MC analysis of some bioactive constituents from *Carthamus lanatus* L. *Z. Naturforsch.* 2003. Vol. 58. P. 697—703.
27. Nezbrytska I., Usenko O.M., Konovets I. et al. Potential use of aquatic vascular plants to control cyanobacterial blooms: a review. *Water*. 2022. Vol. 14, N 11. 1727.
28. Ratushnyak A.A. The investigation of exometabolism of some aquatic macrophytes. *Global J. Environ. Research*. 2008. Vol. 2, N 2. P. 92—95.
29. Ratushnyak A.A., Abramova K.I., Shagidullin R.R. et al. Ecologic plasticity of *Typha angustifolia* under the action of nitrate-nitrogen. *World Applied Sci. J.* 2010. Vol. 8, N 8. P. 1032—1035.
30. Romanenko V.D., Sakevich A.I., Usenko O.M. On the mechanism of the action of easily oxidized phenols on the photosynthetic activity of algae. *Hydrobiol. J.* 2006. Vol. 42, N 2. P. 87—97.
31. Sakevich O.Y., Usenko O.M. Exometabolites of aquatic macrophytes of the phenol origin and their influence on the vital activity of planktonic algae. *Ibid.* 2003. Vol. 39, N 5. P. 31—39.
32. Usenko O.M. Comparison studies on the content of phenols and quinones in the phytomass of higher aquatic plants under natural conditions. *Ibid.* 2012. Vol. 48, N 6. P. 73—80.

33. Usenko O.M., Konovets I.N. Analysis of phenolcarboxylic acids content in phytomass of higher aquatic plants. *Ibid.* 2014. Vol. 50, N 5. P. 47—60.
34. Usenko O.M., Konovets I.N., Tarashchuk O.S., Gorbunova Z.N. Phenolcarboxylic acids of the submerged aquatic plants and their effect on phytoepiphyton structure. *Ibid.* 2019. Vol. 55, N 6. P. 55—64.
35. Xing-Guang Xie. A review of allelopathic researches on phenolic acids. *Acta Entomologica Sinica*. 2014. Vol. 34, N 22. P. 324—334.

Надійшла 19.09.2022

O.M. Usenko, PhD (Biol.), Senior Researcher, Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: oleg.mikh.usenko@gmail.com
ORCID 0000-0002-0782-7292

I.M. Konovets, PhD (Biol.), Senior Researcher, Head of Laboratory,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

CONTENT OF PHENOL CARBOXYLIC ACIDS IN THE WATER OF THICKETS OF AQUATIC VASCULAR PLANTS OF VARIOUS ECOLOGICAL GROUPS

The qualitative and quantitative composition of phenol carboxylic acids in the water of thickets of aquatic vascular plants of different ecological groups was studied: aerial-aquatic plants (*Typha angustifolia* L., *Scirpus lacustris* L., *Phragmites australis* (Sav.) Trin. ex Steud.), submerged plants (*Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L.) and floating-leaf plants (*Nuphar lutea* L., *Trapa natans* L.). Benzoic, *p*-oxybenzoic, salicylic, cinnamic, α -resorcylic, β -resorcylic, protocatechuic, coumaric, vanillic, gallic, caffeic, syringic, ferulic and sinapic acids were found in the water where the mentioned macrophytes were growing. The total content of carboxylic acids in the water of the thickets of the studied plants was: for *T. angustifolia* — 114.7 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, *Sc. lacustris* — 24.71 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, *T. natans* — 56.14 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, *N. lutea* — 19.3 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, *C. demersum* — 25.42—38.66 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, and *M. spicatum* — 1.42—2.83 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$.

Analysis of the content of carboxylic acids in the water of *Ph. australis* thickets during the spring-autumn period revealed significant differences in the ratio of individual acids and in their distribution by groups. The maximal content of benzoic and salicylic acids in the water of thickets was recorded at the beginning of plant development, with its subsequent decrease until the end of the growing season. The maximal content of vanillic and gallic acids was recorded during active vegetation. The content of carboxylic acids from the oxy-cinnamic (cinnamic and ferulic) group was the lowest at the beginning of the growing season.

Cluster analysis of carboxylic acids content in the thickets of *C. demersum* and *M. spicatum* at two sampling points (Sobache Girlo and Verblud bays, the upper part of the Kanev reservoir) reveals two groups; the first group combines benzoic and gallic acids, the second group unites other acids. Principal component analysis (PCA) reveals a high correlation between the qualitative and quantitative indicators of the of carboxylic acids content in the water of thickets and the dominant species of vascular plant. This may indicate the leading role of higher aquatic plants in the formation of these substances pool in water.

Keywords: phenolic carboxylic acids, aquatic vascular plants, seasonal dynamics, cluster analysis.