

Ю. В. Белик¹✉, В. М. Савосько², Ю. В. Лихолат¹,
О. О. Іжболдін³, Т. Ю. Лихолат¹

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010

²Криворізький державний педагогічний університет,
просп. Гагаріна, 54, м. Кривий Ріг, Україна, 50086

³Дніпровський державний аграрно-економічний університет,
вул. Сергія Єфремова, 25а, м. Дніпро, Україна, 49000

ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ УМІСТУ ФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК У ЛИСТКАХ ДЕРЕВ, ЯКІ ПРИРОДНО ПОШИРЕНІ НА ДЕВАСТОВАНИХ ЗЕМЛЯХ ЗАЛІЗОРУДНОГО ВІДВАЛУ

Актуальність досліджень зумовлена необхідністю еколого-фізіологічного обґрунтування переліку видів деревних рослин, перспективних для фітооптимізації (залісення) девастованих земель у промислово розвинених регіонах. Мета дослідження – з позицій екосистемного підходу з'ясувати варіабельність умісту фенольних сполук у листках деревних видів рослин, що природно зростають на девастованих землях залізорудного відвалу. Матеріалами для виконання роботи слугували результати власних досліджень, які отримано упродовж 2017–2022 рр. на території девастованих земель Петровського залізорудного відвалу (Криворізький гірничо-металургійний регіон, Дніпропетровська обл.). У межах п'яти дослідних ділянок, які розташовані у контрастних екологічних умовах відвалу та однієї контрольної (Гурівський ліс, Долинський р-н, Кіровоградська обл.), досліджено вміст фенольних сполук у листках трьох видів деревних рослин: берези повислої (*Betula pendula* Roth.), клена ясенелистого (*Acer negundo* L.) та робінії звичайної (*Robinia pseudoacacia* L.). Концентрації фенолів визначали спектрометрично в екстракті 80%-ного ізопропанолу з реактивом Фоліна-Чокальтеу. Вміст суми фенольних сполук розраховували за калібрувальною кривою, яка була побудована за гисловою кислотою як стандарт та наводили у мг еквівалента гислової кислоти на 1 г сухої наважки (мг ЕГК/г с.н.). Установлено, що в межах контрольної ділянки вміст фенольних сполук у листках берези повислої (26,90–27,49 мг ЕГК/г с.н.) та робінії звичайної (10,98–11,65 мг ЕГК/г с.н.) знаходився в діапазоні їх природних концентрацій, у листках клена ясенелистого (17,53–18,11 мг ЕГК/г с.н.) був менший за доступні літературні дані. На теренах девастованих земель відвалу вміст фенольних сполук у листках всіх видів деревних рослин на всіх дослідних ділянках статистично достовірно відрізняється від контрольних значень. У листках клена ясенелистого та робінії звичайної спостерігалось збільшення концентрацій фенолів відносно умовно чистих територій відповідно на 15–65 та 115–165 % ($P < 0,05$). У листках берези повислої вміст цих сполук був менший за контрольні значення на 10–28 % ($P < 0,05$). За вектором збільшення стійкості деревних видів рослин до

✉ E-mail: belik.uliya@gmail.com

екологічних умов девастрованих земель Петровського залізорудного відвалу побудовано такий ряд упорядкування: береза повисла > клен ясенелистий > робінія звичайна. За показником несприятливості екологічних умов ранжування дослідних ділянок відвалу від мінімальних до максимальних значень відбувалося наступним чином: I < IV < V < III < II.

Ключові слова: девастровані землі, фенольні сполуки, Клен ясенелистий, Береза повисла, Робінія звичайна, залізорудний відвал, Криворіжжя.

**Y. V. Bielyk¹✉, V.M. Savosko², Y. V. Lykholat¹,
O. O. Izhboldin³, T. Y. Lykholat¹**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Kryvyi Rih State Pedagogical University, Kryvyi Rih, Ukraine

Dnipro State Agrarian and Economics University, Dnipro, Ukraine

CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN LEAVES OF TREES GROWING ON DEVASTATED LANDS AT IRON WASTE ROCK DUMP

Knowledge about the content of phenolic compounds in tree leaves growing on devastated lands may be important for foresting of the post-mining landscapes and for improving environmental quality in industrial areas. The object of this study was on standpoint of an ecosystem approach to determine the phenolic compounds concentrations in the leaves of the trees that grow naturally on the devastated lands at iron waste rock dump. Petrovsky waste rock dump areas at Kryvyi Rih Iron Ore Mining & Metallurgical District (central part of Ukraine) were chosen for the present research. During 2017–2021, the 5 research plots in the dump's area and 1 research plot in the background area (natural ecosystems of the Hurivskyi forest, Kirovohradska oblast) were established. The content of phenolic compounds was investigated in the leaves of three woody plants species: silver birch (*Betula pendula* Roth.), ashleaf maple (*Acer negundo* L.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). The extracts of leaves were prepared by extraction of 80% isopropanol. The phenols concentration was determined using Folin-Ciocalteu reagent. The absorbance was measured by spectrophotometer at wavelength of 725 nm. The calibration curve was constructed using standard solutions of gallic acid. The phenols concentration was expressed as gallic acid equivalents in milligrams per gram dry weight of plant material (mg GAE * g⁻¹ dw). The results showed that in background area the values for phenolic compounds content vary within minimal limits: from 26,90 to 27,49 mg GAE * g⁻¹ dw in leaves of silver birch, from 17,53 to 18,11 mg GAE * g⁻¹ dw in leaves of ashleaf maple and from 10,98 to 11,65 mg GAE * g⁻¹ dw in leaves of black locust. In all the samples, the concentrations of phenolic in the leaves of silver birch and black locust were generally within natural limits. The concentrations of phenolic in the leaves of ashleaf maple were below the natural levels. According to the leaves analyses, the phenolic compounds content in all woody plants species from all research plots on the devastated lands were statistical significant differences than the reference samples (P < 0,05). The levels of phenolic in samples of ashleaf maple and black locust were found to be greater (P < 0,05) than the background values about 15–65% and 115–165%, respectively. The concentration of phenolic in leaves of silver birch was lower (about 10–28%, P < 0,05) than those values recorded as control. The

woody plants species according to resistance to the devastated lands of the Petrovsky waste rock dump were in the following decreasing order: silver birch (*Betula pendula* Roth.) > ashleaf maple (*Acer negundo* L.) > black locust (*Robinia pseudoacacia* L.).

Key words: devastated lands, phenolic compounds, black locust, silver birch, ashleaf maple, iron waste rock dump, Kryvyi Rih District.

Вступ

Видобуток корисних копалин та розвиток промисловості з їх переробки супроводжується утворенням кар'єрів, звалищ, відвалів, хвостосховищ та шламосховищ, де спостерігається повне знищення біогеоценотичного покриву і формування девастрованих земель. Доведено, що такі землі є причиною низки негативних явищ, зокрема: 1) забруднення повітря, ґрунту, поверхневих/підземних вод прилеглих територій; 2) поширення агресивних інвазивних та небезпечних отруйних/алергійних видів рослин; 3) зменшення біорізноманіття, деградації екосистем та втрати екосистемних послуг; 4) істотне зниження якості життя людини у промислових регіонах [6, 11, 15, 16, 46]. Слід зазначити, що площі девастрованих земель постійно збільшуються і сягають у світі майже 1,5 млн га, в Україні – 500 тис. га, у Дніпропетровській області – 60 тис. га, у тому числі у Криворізькому регіоні – 30 тис. га [5, 11, 16, 38]. У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є обґрунтування заходів фітооптимізації/залісення цих земель [1, 5, 6, 13, 29, 43]. Тому з'ясування екологічних особливостей деревних видів рослин, що природно зростають на девастрованих землях, залишається пріоритетним напрямком сучасних наукових досліджень.

Останнім часом для моніторингу стану деревних видів рослин в умовах значного техногенного навантаження використовують широкий спектр індикаторних ознак: 1) життєвість та біометричні характеристики деревостану; 2) морфометричні показники листової пластини; 3) вміст важких металів та макронутрієнтів; 4) вміст у листках фізіологічно важливих речовин [2, 7, 9, 17, 18, 21, 25]. Як відомо, деревні рослини здатні синтезувати різноманітні органічні сполуки [4, 7, 21, 24], серед яких особливої уваги потребують речовини, що мають фенольну природу.

За сучасними уявленнями фенольні сполуки – це біологічно активні речовини та їх похідні, що містять у своїй структурі ароматичне кільце з однією або декількома гідроксильними групами [9, 19, 22, 35]. Ці метаболіти зустрічаються в усіх органах рослини, але найбільша їх концентрація спостерігається в листках, квітках, нестиглих плодах. Фенольні сполуки виконують широкий спектр адаптивних функцій у рослин: 1) нейтралізують дію вільних радикалів; 2) беруть участь у захисті організму від захворювань (інгібують розмноження патогенних бактерій, вірусів і грибів); 3) зумовлюють наявність алелопатичних ефектів [12, 26, 31, 33, 37]. Відомо, що феноли також беруть участь у забезпеченні стійкості рослин до екстремальних умов зростання [7, 9, 22, 28, 31, 33].

Вивченню фенольних сполук у рослинах присвячено значну кількість наукових робіт [8, 23, 27, 30, 32, 36], проте донині залишаються нез'ясованими деякі аспекти фізіології деревних видів, що природно зростають на девастрованих землях. Саме тому набуває великого значення й актуальності дослідження вмісту фенольних сполук у листках деревних видів рослин, природно

поширених на девастрованих землях Криворіжжя. Розгляду цієї проблеми і присвячена наша стаття.

Мета роботи – з позицій екосистемного підходу з'ясувати варіабельність вмісту фенольних сполук у листках деревних видів рослин, що природно зростають на девастрованих землях залізорудного відвалу.

Матеріали та методи дослідження

Матеріалами роботи слугували результати власних досліджень, які виконували впродовж 2017–2022 рр. на території девастрованих земель Петровського залізорудного відвалу (рис. 1).

Петровський залізорудний відвал розташований в центральній частині Криворізького гірничо-металургійного регіону (Дніпропетровська обл., Україна). Попередньо нами з'ясовано, що на теренах цього відвалу природно зростають 33 види дерев і чагарників, які належать до 26 родів та 15 родин. Частка алохтонних видів, порівняно з автохтонними, домінує – 59,4 %. Найчисельнішими родинами є розові (*Rosaceae* Juss.), вербові (*Salicaceae* Mirb.), кленові (*Aceraceae* Juss.) та в'язові (*Ulmaceae* Mirb.) [3]. Проведений аналіз вмісту важких металів та макронутрієнтів у ґрунтах відвалу і в листках дерев, що природно поширені на його території, довів наявність дефіциту біофільних елементів (фосфору і калію) та надмірний вміст заліза, марганцю, свинцю та кадмію [25, 44]. Також нами встановлено, що життєвий стан деревних видів рослин на відвалі ослаблений, а показники життєвості деревостану на 21–28 % нижчі за контрольні значення.

У межах Петровського залізорудного відвалу було закладено п'ять дослідних ділянок, які розташовані у контрастних (за часом відсипки, експозицією схилів, формами мікрорельєфу) екологічних умовах (рис. 1). Контрольна ділянка закладена в Гурівському лісі (Долинський район, Кіровоградська обл.), віддалена більш ніж на 30 км від промислових підприємств та більш ніж на 3,0 км від автомобільного шляху.

Об'єкт досліджень – листки трьох видів деревних рослин: берези повислої (*Betula pendula* Roth.), клена ясенелистого (*Acer negundo* L.) та робінії звичайної (*Robinia pseudoacacia* L.). Відбір проб листків та їх підготовка до лабораторних аналізів були виконані восени 2021 р. за класичними методиками [2].

Застосована нами методика визначення вмісту суми фенольних сполук у листках деревних видів рослин ґрунтується на окислювально-відновній реакції фенолів з реактивом Фоліна-Чокальтеу, до складу якого входять вольфрамат і фосфомолібдат натрію. Інтенсивність блакитного забарвлення, що з'являється та пропорційна рівню вмісту фенольних сполук, оцінено спектрофотометричним методом. Уміст суми фенольних сполук розраховували за калібрувальною кривою, яка була побудована за галовою кислотою як стандартом [14, 20, 34, 42].

Визначення вмісту суми фенольних сполук у листках дерев виконувалося за методикою Singleton et al. [45] у модифікації Nwanna et al. [30]. Екстракція фенольних сполук: наважку (0,2 г) рослинного матеріалу розтирали у порцеляновій ступці у присутності 5 мл 80 % ізопропанолу, переносили у бюкс і залишали на 16–24 години за кімнатної температури. Далі розчин фільтрували, доводили об'єм до 5 мл, зберігали у холодильнику при температурі 4 °С. Визначення фенольних сполук: відбирали у пробірки 0,2 мл екстракту та додавали 0,2 мл дистильованої води, 1 мл 10 % розчину Фоліна-Чокальтеу і 0,8 мл 7,5 % розчину карбонату натрію. Пробірки закривали пробками

і витримували у термостаті протягом 40 хв при температурі 45⁰. Оптичну густину охолоджених проб вимірювали за довжини хвилі 725 нм у кюветах товщиною 0,3 см. Вміст суми фенольних сполук перераховано та представлено у мг еквівалента галової кислоти на 1 г сухої наважки (мг ЕГК/г с.н.).

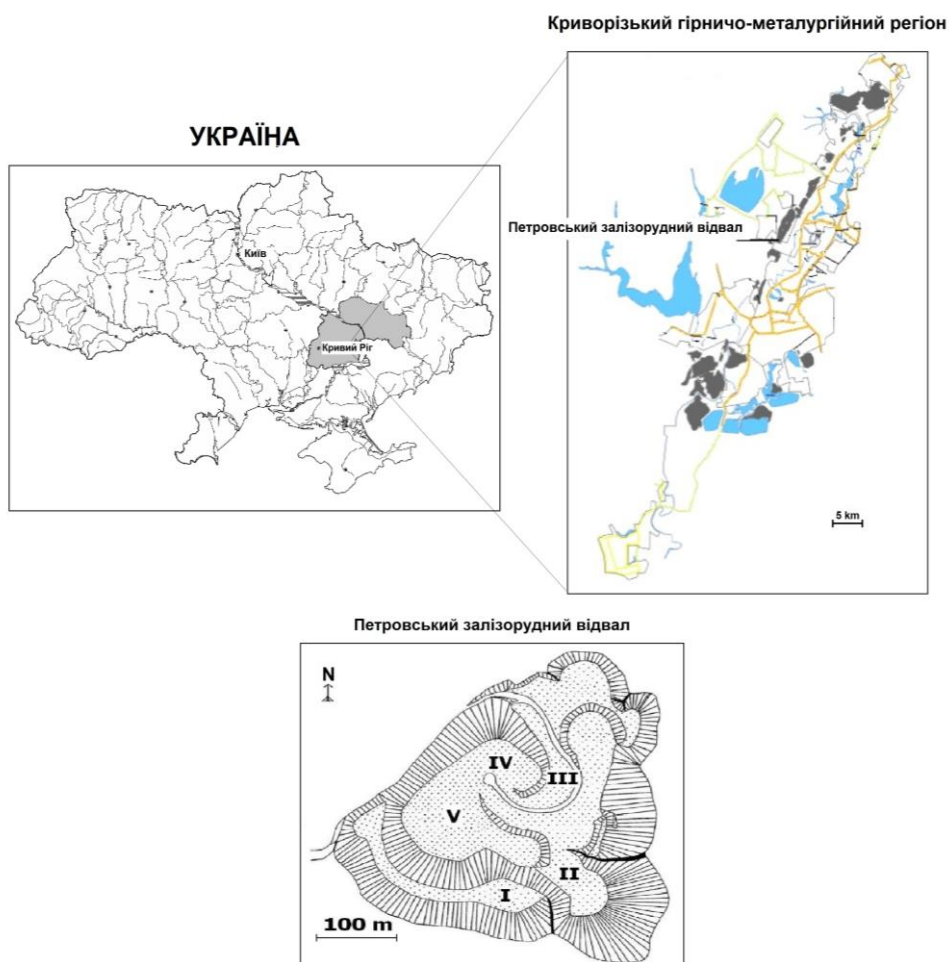


Рис. 1. План-схема Петровського залізрудного відвалу
(I, II, III, IV, V – дослідні ділянки)

Експерименти проводили у триразовому повторенні. Статистичну обробку отриманих даних виконували з використанням методів та алгоритмів варіаційної статистики на 95%-ному рівні значущості. Достовірність різниці між контрольними та дослідними зразками оцінювали за коефіцієнтом відмінності Ст'юдента ($p < 0,05$) [10, 39].

Результати та їх обговорення

Уміст фенольних сполук на контрольній ділянці. Аналіз отриманих результатів показав, що на контрольній ділянці серед видів деревних рослин у

листках *B. pendula* встановлено найвищий уміст фенольних сполук: від 26,90 до 27,49 мг ЕГК/г с.н. (при середньому значенні $27,13 \pm 0,18$ мг ЕГК/г с.н.). Концентрації фенолів у листках *A. negundo* були менші $17,53 \pm 0,17$ мг ЕГК/г с.н. (межі коливань 17,53–18,11 мг ЕГК/г с.н.). У листках *R. pseudoacacia* виявлено найменший уміст фенольних сполук: від 10,98 до 11,65 мг ЕГК/г с.н. (середнє значення $11,24 \pm 0,21$ мг ЕГК/г с.н.).

Уміст фенольних сполук у листках деревних видів рослин, що зростають у природних умовах, неодноразово був предметом наукових досліджень і темою наукових публікацій. В основному це результати дослідження біологічно активних речовин рослинного походження як перспективної сировини для фармакології, косметології та харчової промисловості [21, 24, 30, 31, 40].

Однак дослідники у своїх роботах застосовували різні методики визначення вмісту фенольних сполук у листках дерев, що зумовлено різноманітністю: 1) екстрагентів вилучення (переважно це етанол, метанол, ізопропанол, ацетон, дистильована вода тощо), їх концентрацій та співвідношення (наважка : розчин); 2) реактивів забарвлення (в основному це реактиви Фоліна-Деніса та Фоліна-Чокальтеу); 3) стандартів для розробки калібрувальної кривої та представлення кінцевих результатів (переважно це галова, ферулова та хлорогенова кислоти). Все це значно ускладнює узагальнення отриманих результатів природного вмісту фенольних сполук у листках деревних видів рослин (таблиця).

За даними доступних наукових публікацій, природний уміст фенольних сполук у листках *B. pendula* знаходиться у межах 18–171 мг ЕГК/г с.н. (таблиця). Слід зазначити, що спостерігається тенденція до збільшення концентрацій цих сполук у зразках з гірських територій (м. Софія, Болгарія та м. Скоп'є, Македонія) – від 50 до 170 мг ЕГК/г с.н. У зразках з рівнинних територій цей показник становить 20–70 мг ЕГК/г с.н. (незалежно від екстрагенту). Як нами раніше зазначалося, уміст фенолових сполук у листках *B. pendula* на контрольній ділянці становив 26-28 мг ЕГК/г с.н. – такі значення знаходяться в діапазоні їх природних концентрацій, проте тяжіють до мінімальних показників (таблиця).

На відміну від берези повислої, клен ясенелистий не є загально визнаною лікарською рослиною. Тому дуже мало доступних літературних даних щодо вмісту фенольних сполук у листках цього виду. У зв'язку з цим нами проаналізовано концентрації фенолів у листках різних видів роду Клен (таблиця). За даними доступних наукових публікацій, природний уміст фенольних сполук у листках роду Клен знаходиться у досить широкому діапазоні – від 30 до 200 мг ЕГК/г с.н. При цьому максимальні концентрації (115–125 мг ЕГК/г с.н. витяжка дистильована вода та 195–200 мг ЕГК/г с.н. витяжка 95 % етанолу) виявлені в *A. tegmentosum*, який є лікарською рослиною у країнах Південно-Східної Азії. Для інших видів клену межі концентрацій фенольних сполук значно менші та не перевищують 35–65 мг ЕГК/г с.н. (незалежно від екстрагенту (дистильована вода, ацетон, метанол, етанол) та місцезростання (Європа, Південно-Східна Азія, Північна Африка)). За результатами наших досліджень вміст фенольних сполук у контрольних зразках листків *A. negundo* (17–19 мг ЕГК/г с.н.) менший, ніж дані доступних наукових публікацій їх природного вмісту.

**Природний уміст фенольних сполук у листках деревних видів рослин
(забарвлення за реактивом Фоліна-Чокальтеу, калібрувальна крива
за галовою кислотою)**

Місце відбору зразків	Екстрагент фенольних сполук	Уміст фенольних сполук, мг ЕГК / г с.н.	Посилання
<i>Береза повисла (Betula pendula Roth.)</i>			
м. Запоріжжя, Україна	Дист. вода	63–69	Скляренко, Бессонова, 2020 [19]
м. Софія, Болгарія	80 % метанол	55–105	Christova-Bagdassrian et al., 2014 [27]
м. Скоп'є, Македонія	70 % етанол	166–171	Chilku et al., 2016 [26]
м. Кайнуу, Фінляндія	50 % етанол	41–67	Isosaari et al., 2021 [32]
м. Турку, Фінляндія	70 % ацетон	37–39	Kahkonen et al., 1999 [33]
м. Калінінград, РФ	96 % етанол	18–24	Масленников та ін., 2018 [12]
<i>Клен ясенелистий (Acer negundo L.)</i>			
м. Запоріжжя, Україна	Дист. вода	56–64	Скляренко, Бессонова, 2020 [19]
<i>Клен гостролистий (Acer platanoides L.)</i>			
м. Турку, Фінляндія	70 % ацетон	30–34	Kahkonen et al., 1999 [33]
м. Калінінград, РФ	96 % етанол	42–52	Масленников та ін., 2018 [12]
<i>Клен польовий (Acer campestre L.)</i>			
Національний парк Таза, Алжир	80 % метанол	54–61	Atroune et al., 2019 [23]
<i>Клен довговидний (Acer palmatum Thunb.)</i>			
м. Кванджу, Південна Корея	Дист. вода	33–45	Park, 2021 [41]
<i>Клен зеленокорий (Acer tegmentosum Maxim.)</i>			
м. Дечон, Південна Корея	Дист. вода 95 % етанол	115–123 194–200	Lee et al., 2017 [36]
<i>Робінія звичайна (Robinia pseudoacacia L.)</i>			
м. Запоріжжя, Україна	Дист. вода	45–59	Скляренко, Бессонова, 2020 [19]
гора Зобор, Словачія	80 % етанол	9,5–10,5	Gayibova et al., 2019 [31]
м. Тімішоара, Румунія	70 % етанол	15–17	Obistioiu et al., 2021 [40]
м. Келіменешць, Румунія	70 % етанол	17–22	Marinas et al., 2014 [37]
м. Крагуєвац, Сербія	50 % метанол	8,5–8,9	Cvetkovic et al., 2019 [28]

Примітка: ЕГК – еквівалент галової кислоти, с.н. – суха наважка, дист. вода – дистильована вода.

Дані таблиці свідчать, що діапазон коливань природних концентрацій фенольних сполук у листках *R. pseudoacacia* є незначним – від 8,5 до 59 мг ЕГК/г с.н. Водночас максимальні значення цього показника (45–59 мг ЕГК/г с.н.) виявлені при екстракції дистилюваною водою. У випадках застосування органічних екстрагентів (метанол, етанол) кількість фенолів була менша 8,5–22,0 мг ЕГК/г с.н. Нами встановлено, що на контрольній ділянці вміст фенольних сполук у листках *R. pseudoacacia* сягав значень 11–12 мг ЕГК/г с.н. Такі показники знаходяться у межах їх природних концентрацій (за даними доступних наукових публікацій), проте, як і в зразках берези повислої, знаходяться на рівні мінімальних значень.

Уміст фенольних сполук на дослідних ділянках. Уміст фенольних сполук у всіх зразках листків дерев, що зростають на девастованих землях Петровського залізорудного відвалу, статистично достовірно ($P < 0,05$) відрізняється від контрольних показників (рис. 2). Так, концентрації фенолів у листках *B. pendula* на всіх дослідних ділянках відвалу *менші порівняно з контролем*. Водночас мінімальна їх кількість виявлена на ділянці II ($17,89 \pm 0,14$ мг ЕГК/г с.н.), що на 34 % нижче за контроль ($P < 0,05$). На ділянках III, I та V вміст фенольних сполук у листках *B. pendula* був приблизно однаковим: 19,66, 19,70 та 21,86 мг ЕГК/г с.н. відповідно. Такі концентрації на 17–19 % нижчі, ніж у контрольному зразку ($P < 0,05$). Максимальне значення цього показника було встановлено на ділянці IV ($24,53 \pm 0,13$ мг ЕГК/г с.н.), що лише на 9,5 % менше за контроль ($P < 0,05$).

Аналіз отриманих результатів показав, що концентрації фенольних сполук у всіх зразках листків *A. negundo*, що природно зростає на теренах Петровського відвалу, статистично достовірно ($P < 0,05$) вищі за контроль (рис. 2). Мінімальні значення цього показника встановлені на ділянці I – $20,47 \pm 0,33$ мг ЕГК/г с.н., що на 15 % перевищують контрольні показники ($P < 0,05$).

Установлено, що на дослідних ділянках II, IV та V вміст фенольних сполук у листках *A. negundo* сягав значень відповідно 23,87, 24,45 та 25,48 мг ЕГК/г с.н., а це на 34, 37 та 43 % вище за контроль ($P < 0,05$). Максимальні концентрації цих біологічно активних речовин виявлені у зразках, зібраних на ділянці III – $29,45 \pm 0,20$ мг ЕГК/г с.н., що на 66 % вище за контрольні значення ($P < 0,05$). За результатами біохімічного аналізу листків *R. pseudoacacia* з'ясовано максимальне, серед досліджених видів деревних рослин, збільшення вмісту фенольних сполук, до того ж на всіх дослідних ділянках (рис. 2). Концентрації цих речовин статистично достовірно перевищують контроль у 2,2 разу на ділянці V, у 2,3 разу – на ділянці III та у 2,7 разу – на ділянці I ($P < 0,05$).

Порівнюючи вміст фенольних сполук у листках дерев з контрольної та дослідних ділянок, нами були проаналізовані такі показники, як стійкість деревних видів до умов девастованих земель відвалу та несприятливість екологічних умов дослідних ділянок відвалу для цих видів рослин. Вважають, чим менша відмінність концентрацій фенолів у листках між контрольними та дослідними ділянками, тим більш стійким є вид та менші несприятливі екологічні умови ділянки. За вектором збільшення стійкості деревних видів рослин до екологічних умов девастованих земель Петровського залізорудного відвалу встановлений такий ряд упорядкування: Береза повисла (*Betula pendula* Roth.) > Клен ясенелистий (*Acer negundo* L.) > Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.). За показником несприятливості екологічних умов дослідні

ділянки відвалу упорядковуються від мінімальних значень до максимальних наступним чином: I < IV < V < III < II.

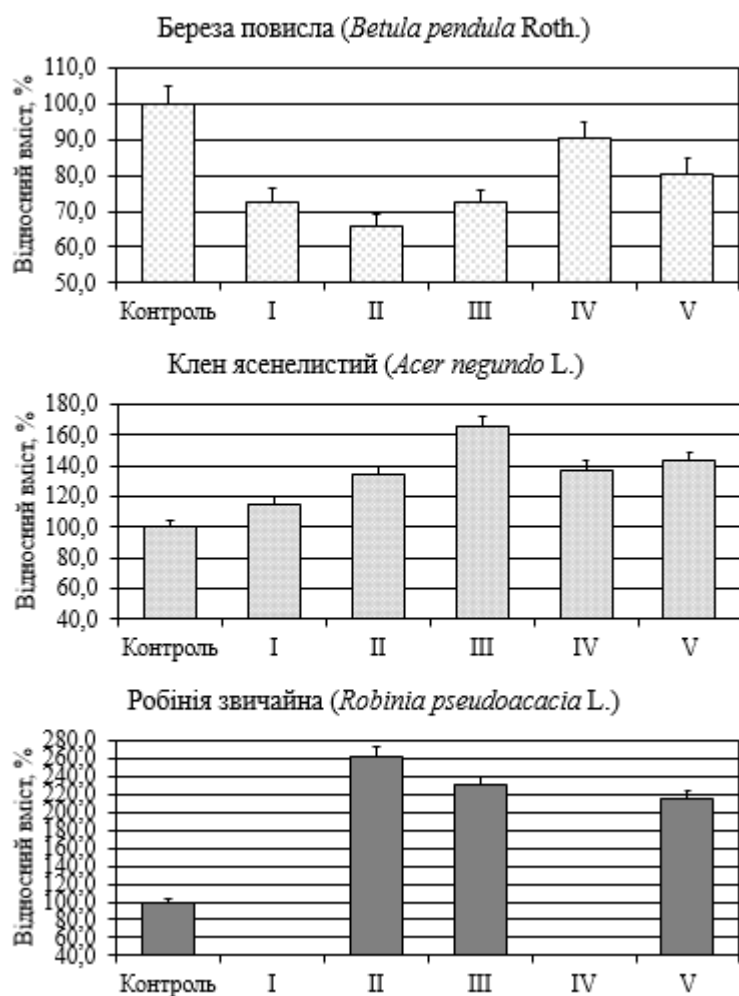


Рис. 2. Відносний вміст фенольних сполук у листках деревних видів рослин, які природно зростають на девастрованих землях Петровського залізорудного відвалу (вміст у контрольних зразках дорівнює ста відсоткам; I, II, III, IV, V – дослідні ділянки)

Обговорення. На теренах Петровського залізорудного відвалу вміст фенольних сполук у листках деревних видів рослин статистично достовірно ($P < 0,05$) відрізнявся від контрольних значень. При цьому було з'ясовано як збільшення (*A. negundo* та *R. pseudoacacia*), так і зниження (*B. pendula*) концентрації цих біологічно активних речовин.

Отримані нами результати щодо збільшення вмісту фенольних сполук у листках дерев, які природно поширені на девастрованих землях залізорудного відвалу, добре узгоджуються з попередніми дослідженнями та сучасними теоретичними положеннями. Так, в умовах забрудненого урбанізованого

середовища концентрації фенолів у листках берези повислої перевищують контрольні значення на 15–75 % [12]. А. В. Скляренко та В. П. Бессонова [19] встановили, що на території санітарно-захисних зон промислових підприємств м. Запоріжжя вміст фенольних сполук у листках *B. pendula* вищі за контроль в 2,5–25 разів, *A. negundo* – в 3,8, а подекуди і в 17,3 разу, *R. pseudoacacia* – в 2,5–12,0 разів. На думку провідних експертів, різноманітні стресові фактори довкілля призводять до прискорення біосинтезу фенольних сполук та їх накопичення у листках деревних видів рослин [4, 9, 22, 26, 42].

Наші дані щодо зменшення вмісту фенольних сполук у листках *B. pendula*, що природно зростає на девастованих землях залізорудного відвалу, досить суперечливі. Дійсно, найпоширенішою реакцією рослин на ускладнення екологічних умов росту та розвитку є збільшення концентрацій цих сполук у листках [19, 23, 27, 31, 40, 41]. Проте в окремих публікаціях зазначається зворотна тенденція. Зокрема, встановлено, що в промислово-комунальній зоні міста, у порівнянні із зоною рекреації та відпочинку, вміст фенольних сполук в листках був меншим: у калини звичайної (*Viburnum opulus* L.) – в 1,5 разу, бузка звичайного (*Syringa vulgaris* L.) – в 1,6 разу, у порічок альпійських (*Ribes alpinum* L.) – в 1,7 разу, садового жасмину звичайного (*Philadelphus coronarius* L.) – в 1,9 разу, клену гостролистого (*Acer platanoides* L.) – в 2,4 разу [12].

На нашу думку, менші у порівнянні з контролем концентрації фенольних сполук у листках берези повислої на відвалі можуть бути результатом їх сезонної динаміки. Дослідження в урбанізованому середовищі сезонного вмісту фенольних сполук у листках берези повислої виявило максимальні значення у травні. Надалі спостерігалось зменшення їх кількості у липні–серпні на 27–38 % [8, 27]. У вересні вміст фенолів поступово збільшувався, фактично сягаючи травневого рівня. Автори пояснюють таку тенденцію посушливістю літніх місяців, що й гальмує більшість біохімічних та фізіологічних процесів у деревних рослин. Можливо, екологічні умови девастованих земель залізорудного відвалу збільшують інтенсивність та тривалість посушливого періоду, що зумовлює такі невисокі рівні (у порівнянні з контролем) вмісту фенольних сполук у листках берези повислої. Отримані результати не суперечать можливості використання показників вмісту фенолів як маркера екологічного стану девастованих земель.

Висновки

У межах контрольної ділянки вміст фенольних сполук у листках *Betula pendula* та *Robinia pseudoacacia* знаходився в діапазоні їх природних концентрацій, у листках *Acer negundo* був менший за доступні літературні дані.

На теренах девастованих земель Петровського залізорудного відвалу вміст фенольних сполук у листках всіх видів деревних рослин на всіх дослідних ділянках статистично достовірно відрізняється від контрольних значень. У *A. negundo* та *R. pseudoacacia* спостерігалось збільшення, тоді як у *B. pendula* – зменшення концентрацій фенолів відносно умовно чистих територій. За вектором збільшення стійкості деревних видів рослин до екологічних умов девастованих земель відвалу встановлено такий ряд упорядкування: *Betula pendula* > *Acer negundo* > *Robinia pseudoacacia*. За показником несприятливості екологічних умов ранжування дослідних ділянок відвалу від мінімальних значень до максимальних відбувалося наступним чином: I < IV < V < III < II.

Отримані результати можуть бути використані для проектування і створення штучних деревних насаджень на деєастованих землях Криворіжжя та в інших промислових регіонах України та світу. У майбутніх дослідженнях доцільно визначити екологічну детермінованість вмісту фенольних сполук у листках деревних видів рослин, що природно зростають на деєастованих землях залізрудного відвалу.

Бібліографічні посилання

1. [Артюх В.М.](#) Оптимізація техногенних ландшафтів залізрудних розробок Кривбасу. Вінниця: Вінницький державний аграрний університет, 2001. 198 с.
2. [Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В.](#) Екологічна обумовленість показників життєвості та дендрометричних параметрів дендрофітоценозів природно поширених на деєастованих землях залізрудного відвалу // Вісник ОНУ. Біологія. 2022. Т. 27, Вип. 1(50). С. 7–23.
3. [Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В.](#) Таксономічний склад та синантропна характеристика деревно-чагарникових угруповань Петровського відвалу (Криворіжжя) // Екологічний вісник Криворіжжя. 2019. Вип. 4. С. 104–114.
4. [Бобошко О., Панюта О., Артеменко О., Таран Н., Ємельянов В.](#) Патоген-індуковане накопичення калози та фенольних сполук у проростках озимої пшениці // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Біологія. 2018. Вип. 76, № 2. С. 66–71.
5. [Демидов А.А., Кобеє А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В.](#) Пространственная агроэкология и рекультивация земель. Днепропетровск: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2013. 560 с.
6. [Євтушенко Е.О., Поздній Є.В., Комарова І.О., Коваленко Л.Г.](#) Еколого-таксономічна структура деревно-чагарникових рослинних угруповань промислових майданчиків ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» // Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. 2019. Том 48. С. 47–61.
7. [Іванько І.А., Кулік А.Ф.](#) Оцінка адаптаційних можливостей аборигенних та адвентивних видів деревних рослин Дніпропетровщини // Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. 2021. Том 50. С. 12–21.
8. [Кавелєнова Л.М., Лищинская С.Н. Карандаєва Л.Н.](#) Особенности сезонной динамики водорастворимых фенольных соединений в листьях березы повислой в условиях урбосреды в лесостепи (на примере Самары) // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 91–96.
9. [Кобилецька М., Бойко І., Кавулич Я., Терек О.](#) Фенольні сполуки як компоненти саліцилат-індукованої адаптивної відповіді рослин пшениці на токсичну дію кадмій хлориду // Біологічні студії. 2013. Том 7, № 2. С. 75–82.
10. [Лакин Г.Ф.](#) Биометрия. Москва: Высшая школа, 1990. 352 с.
11. [Малахов И.Н.](#) Новая геологическая сила. Кривой Рог: Отделение морской геологии и осадочного рудообразования, 2009. 312 с.
12. [Лихолат Ю.В.](#) Еколого-фізіологічні особливості багаторічних дерноутворюючих злаків техногенних територій: Монографія. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського ун-ту, 1999. 210 с.
13. [Мицик Л.П., Лихолат Ю.В.](#) Дерновий покрив техногенних територій: Монографія. Дніпропетровськ: ДДУ, 1997. 92 с.

14. [Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Загоскина Н.В.](#) Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина-Дениса и реактивом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение // *Химия растительного сырья*. 2021. № 2. С. 291–299.
15. [Савосько В.Н., Алексеева К.М.](#) Систематический анализ спонтанной дендрофлоры Жовтневого района г. Кривого Рога // *Питання біоіндикації та екології*. 2007. Вип. 12, № 2. С. 16–23.
16. [Савосько В.М.](#) Меліорація та фіторекультивація земель. Кривий Ріг: Видавництво «Діоніс», 2011. 288 с.
17. [Савосько В., Лихолат Ю., Домшина К., Лихолат Т.](#) Екологічна та геологічна зумовленість поширення дерев і чагарників на девастрованих землях Криворіжжя // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. Вип. 27, № 1. С. 116–130.
18. [Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Белик Ю.В., Григорюк І.П.](#) Апофітні та адвентивні деревні види на девастрованих землях гранітних кар'єрів Криворіжжя // *Біоресурси і природокористування*. 2019. Том 11, № 1-2. С. 14–25.
19. [Склярєнко А.В., Бессонова В.П.](#) Вміст водорозчинних фенолів в листках деревних рослин санітарно-захисних зон заводів промислової зони Запоріжжя // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Біологія»*. 2020. Вип. 34. С. 175–184.
20. [Стешенко О.М., Арсеньєва Л.Ю.](#) Визначення параметрів екстракції фенольних сполук фітоадаптаційної суміші // *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2014. Вип. 46, т. 2. С. 51–56.
21. [Твардовська М.О., Конвалиюк І.І., Листван К.В., Андрєєв І.О., Кунях В.А.](#) Вміст фенольних сполук та флавоноїдів у рослинах *in vitro* та культурі тканин *Deschampsia antarctica* E. Desv // *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2020. Том 26. С. 276–281.
22. [Чечуй О.Ф.](#) Вміст фенольних сполук в насінні *Glycine max* L. при проростанні за умов оксидативного стресу, спричиненого впливом іонів кобальту та кадмію // *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*. 2011. Вип. 30. С. 197–200.
23. [Atroune F., Chaker S., Djebbar R., Dahmani-Megrerouche M.](#) Comparative evaluation of phenolics content and antioxidant activity of leaves and branches of field maple (*Acer campestre*) from two populations of Northeastern Algeria // *Analele Universității din Oradea, Fascicula Biologie*. 2019. Tom. XXVI, Issue 1. P. 7–13.
24. [Barrales-Cureño H.J., Salgado-Garciglia R., López-Valdez L.G., Monribot-Villanueva J.L., Guerrero-Analco J.A., Lucho-Constantino G.G., Zaragoza-Martínez F., Herrera-Cabrera B.E., Reyes C.](#) Metabolomic data of phenolic compounds from *Acer negundo* extracts // *Data in Brief*. 2020. Vol. 30. 105569.
25. [Bielyk Y., Savosko V., Lykholat Y., Heilmeyer H., Grygoryuk I.](#) Macronutrients and heavy metals contents in the leaves of trees from the devastated lands at Kryvyi Rih District (Central Ukraine) // *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 01011.
26. [Chilku E., Jovanova B., Ivic Kolevska S., Kadifkova Panovska T.](#) Screening of some plant species for their antioxidant and antibacterial activity // *Macedonian pharmaceutical bulletin*. 2016. Vol. 62 . P. 293–294.

27. **Christova-Bagdassrian V.L., Chohadjieva D., Atanassova M.** Total phenolics and total flavonoids, nitrate contents and microbiological tests in dry extract of bulgarian white birch leaves (*Betula pendula*) // International Journal of Advanced Research. 2014. Vol. 2, issue 6. P. 668–674.
28. **Cvetkovic D.M., Jovankić J.V., Milutinović M.G., Nikodijević D.D., Grbović F.J., Ćirić A.R., Topuzović M.D., Marković S.D.** The anti-invasive activity of *Robinia pseudoacacia* L. and *Amorpha fruticosa* L. on breast cancer MDA-MB-231 cell line // Biologia. 2019. Vol. 74, issue 7. P. 915–928.
29. **Dement W.T., Hackworth Z.J., Lhotka J.M., Barton C.D.** Plantation development and colonization of woody species in response to post-mining spoil preparation methods // New Forests. 2020. № 51. P. 965–984.
30. **Esther E.N., Emmanuel O.I., Ganiyu O.** Inhibitory effects of methanolic extracts of two eggplant species from South-western Nigeria on starch hydrolysing enzymes linked to type-2 diabetes // African Journal of Pharmacy and Pharmacology. 2013. Vol. 7, № 23. P. 1575–1584.
31. **Gayibova S., Aripov T.** *In vitro* screening of antioxidant and antimicrobial activities of medicinal plants growing in Slovakia // Journal of microbiology, biotechnology and food sciences. 2019. Vol. 8, № 6. P. 1281–1289.
32. **Isosaari E., Väisänen J., Favén L.** Electricity consumption of drying and the effect of the dryer and temperature on the chemical quality of nettle leaves (*Urtica dioica* L.), birch leaves (*Betula pendula*, *Betula pubescens*) and roseroot (*Rhodiola rosea* L.). // Research Square (preprint, version 1). 2021.
33. **Kahkonen M.P., Hopia A.I., Vuorela H.J., Rauha J.P., Pihlaja K., Kujala T.S., Heinonen M.** Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds // Journal of agricultural and food chemistry. 1999. Vol. 47, issue 10. P. 3954–3962.
34. **Khromykh N., Lykholat Y., Shupranova L., Kabar A., Didur O., Lykholat T., Kulbachko Y.** Interspecific differences of antioxidant ability of introduced *Chaenomeles* species with respect to adaptation to the steppe zone conditions // Biosystems Diversity. 2018. Vol. 26, № 2. P. 132–138.
35. **Lykholat Y.V., Khromykh N.O., Lykholat T.Y., Didur O.O., Lykholat O.A., Legostaeva T.V., Kabar A.M., Sklyar T.V., Savosko V.M., Kovalenko I.M., Davydov V.R., Bielyk Y.V., Volynik K.O., Onopa A.V., Dudkina K.A., Gryoryuk I.P.** Industrial characteristics and consumer properties of *Chaenomeles* Lindl. fruits. Ukrainian Journal of Ecology. 2019. 9(3), 132–137.
36. **Lee C.E., Jeong H.H., Cho J.A., Ly S.Y.** *In vitro* and *in vivo* anti-oxidative and anti-inflammatory activities of *Acer tegmentosum* Maxim extracts // Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 46, issue 1. P. 1–9.
37. **Marinas I.C., Oprea E., Geana E.I., Chifiriuc C., Lazar V.** Antimicrobial and antioxidant activity of the vegetative and reproductive organs of *Robinia pseudoacacia* // Journal of the Serbian Chemical Society. 2014. Vol. 79, issue 11. P. 1363–1378.
38. **Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., da Silva D.M., Probst M., Gass S.L.B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I.** A global-scale data set of mining areas // Scientific Data. 2020. № 7. P. 289.
39. **McDonald J.H.** Handbook of biological statistics. Baltimore: Sparky house publishing, 2014. 291 p.
40. **Obistioiu D., Cocan I., Tirziu E., Herman V., Negrea M., Cucerzan A.**

[Neacsu A.G., Cozma A.L., Nichita I., Hulea A. Alexa E. Phytochemical profile and microbiological activity of some plants belonging to the Fabaceae family // Antibiotics. 2021. Vol. 10, issue 6. 662.](#)

41. [Park J.S. Analysis of antioxidant efficacy of Ginkgo biloba leaves and Acer palmatum Leaves // Turkish journal of computer and mathematics education \(TURCOMAT\). 2021. Vol. 12, № 6. P. 698–703.](#)

42. [Sanchez-Rangel J.C., Benavides J., Heredia J.B., Cisneros-Zevallos L., Jacobo-Velázquez D.A. The Folin–Ciocalteu assay revisited: improvement of its specificity for total phenolic content determination // Analytical Methods. 2013. Issue 21. P. 5990–5999.](#)

43. [Savosko V.M., Lykholat Y.V., Bielyk Y.V. Foresting of technogenic devastated lands as an effective factor for environmental safety at he mining & metallurgical district // Effects of pollution and climate change on the ecosystem components \(ed.: Y. V. Lykholat\). Praha, Oktan Print. 2021. P. 6–39.](#)

44. [Savosko V., Bielyk Y., Lykholat Y., Heilmeier H., Grygoryuk I., Khromykh N., Lykholat T. The total content of macronutrients and heavy metals in the soil on devastated lands at Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District \(Ukraine\) // Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2021. Issue 30, № 1. P. 153–164.](#)

45. [Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent // Methods in enzymology. 1999. Vol. 299. P. 152–178.](#)

46. [Stanturf J.A., Callaham M.A., Madsen P. Landscape degradation and restoration // Soils and landscape restoration / J. A. Stanturf, M. A. Callaham \(eds.\). New York: Academic Press, 2021. P. 1–37.](#)

Надійшла до редколегії 25.09.2022 р.