

## Інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів та функціональний стан деревних насаджень при забрудненні довкілля важкими металами

Ольга М. ЗУБРОВСЬКА, Віталій М. ГРИШКО

Криворізький ботанічний сад НАН України  
вул. Маршака 50, Кривий Ріг 50089, Україна  
[zubrovska@ukr.net](mailto:zubrovska@ukr.net)

Zubrovskaya O.M., Gryshko V.M. 2019. **Intensity of lipid peroxidation processes and state of tree plantations under heavy metal pollution.** *Ukrainian Botanical Journal*, 76(5): 458–468.

Kryvyi Rih Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine  
50 Marshaka Str., Kryvyi Rih 50089, Ukraine

**Abstract.** The processes of lipid peroxidation induced by heavy metals in leaves of woody species under the influence of an industrial enterprise were studied. In the assimilation organs of *Populus italica*, a high accumulation of most compounds of heavy metals was found (intratissue contamination was over five-fold higher than in the control), with zinc as the most abundant metal. *Aesculus hippocastanum* in the zone of severe pollution most actively accumulated nickel, while *Betula pendula* accumulated cadmium. At early stages of leaves development, high rates of intratissue contamination were observed for all species. In the leaves of *P. italica*, during their morphogenesis, the level of secondary peroxidation products (TBA-active compounds) was lowest among the studied species and did not exceed the control values by more than 1.8 times. This is apparently due to increased intensity of functioning of antioxidant enzyme systems, such as glutathione and ascorbic (Halliwell-Asada cycle), and high phytochelatin and metallothionein biosynthesis in leaves, which stipulate its highest physiological stability to altered environment. Instead, in the leaves of *A. hippocastanum* and *B. pendula* with low levels of accumulation of most heavy metals, the content of TBA-active products increased 2.7 and 2.9 times, respectively, comparing to the control. It has been shown that plantations of *P. italica* in industrial conditions were relatively stable with a total score of assimilation organs, branches and trunk damage up to 1.3, while in *A. hippocastanum* and *B. pendula* a longterm effect of pollutants at monitoring sites resulted in 25–40% of leaves damaged by necroses and chloroses. Skeletal branches of both species were affected by rot, crown rarity reached more than 40%, and frost cracks 20–25% larger than in the control occurred. *Aesculus hippocastanum* and *B. pendula* are characterized by an unstable qualitative state of 30–60% of individuals which are at various stages of dying or significantly depressed.

**Keywords:** *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula*, chloroses, functional state, necroses, *Populus italica*, TBA-active compounds

Submitted 21 November 2018. Published 31 October 2019

Зубровська О.М., Гришко В.М. 2019. **Інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів та функціональний стан деревних насаджень при забрудненні довкілля важкими металами.** *Український ботанічний журнал*, 76(5): 458–468.

**Реферат.** Проведено дослідження розвитку процесів пероксидного окиснення ліпідів, індукованих дією важких металів у листках видів деревних рослин за дії викидів промислового підприємства (ПрАТ "Криворізький суриковий завод"). В асиміляційних органах *Populus italica* встановлено високу інтенсивність акумуляції більшості сполук важких металів (показники внутрішньотканинного забруднення перевищували контроль у понад 5 разів), серед яких максимально інтенсивно концентрувався Цинк. Тоді як *Aesculus hippocastanum* у зоні сильного забруднення найактивніше накопичував Нікель, а *Betula pendula* – Кадмій. Загальною тенденцією для всіх видів на початкових етапах розвитку листків була наявність високих показників внутрішньотканинного забруднення. У листках *P. italica* протягом їхнього морфогенезу рівень вторинних продуктів пероксидації (ТБК-активних сполук) був найнижчим серед досліджуваних видів і не перевищував контрольні показники більше ніж у 1,8 раза. Встановлено, скоріш за все, пояснюється підвищеною інтенсивністю функціонування антиоксидантних ферментних систем, а саме глутатіонової та аскорбінової (цикл Халівала-Асада), та високим рівнем біосинтезу фітохелатинів і металотеонеїнів у листках виду, що обумовлювало його вищу фізіологічну стійкість у змінених умовах довкілля. Натомість у листках *A. hippocastanum* і *B. pendula* при низькому рівні накопичення більшості важких металів вміст ТБК-активних продуктів пероксидації зростав у 2,7 і 2,9 раза порівняно з контролем. Показано, що насадження *P. italica* в промислових умовах виявилися відносно стійкими. Тоді як у *A. hippocastanum* і *B. pendula* довготривала дія полутантів на моніторингових ділянках призводила до ураження 25–40% поверхні листків некрозами і хлорозами. Скелетні гілки обох видів уражалися судинними гнилями, зрідженість крони сягала понад 40%, а на стовбурах зустрічалися морозобійні тріщини на 20–25% більше ніж в умовах контролю. Рослини *A. hippocastanum* і *B. pendula* характеризуються незадовільним якісним станом у 30–60% особин, знаходяться на різних стадіях відмирання чи значно пригнічені.

**Ключові слова:** ТБК-активні сполуки, функціональний стан, хлорози некрози, *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula*, *Populus italica*

## Вступ

Деревні рослини є важливим середовище-утворюючим елементом у містах і сприяють формуванню їхнього ландшафтно-архітектурного вигляду, виконуючи рекреаційну, санітарно-гігієнічну та інші важливі функції. При цьому вони можуть виступати індикаторами стану довкілля. Особливо чутливими до дії стресових факторів є асиміляційні органи, які знаходяться у найбільш тісному контакті із забруднювачами аерогенного характеру (Lukina, Vasilevskaya, 2012; Ramazanova, 2012).

В умовах техногенного забруднення довкілля у великих промислових регіонах з розвиненою металургійною промисловістю міська рослинність акумулює в надлишкових концентраціях різні елементи та сполуки, насамперед важкі метали (Gryshko et al., 2012). Таке поліелементне накопичення токсичних речовин спричинює активацію процесів окиснювальної деструкції в рослинній клітині (Foyer, Shigeoka, 2011; Sima, Fatemeh, 2013). Очевидно, що окисдаційний стрес, як комплекс реакцій організмів на дію стресового чинника, є універсальною відповіддю рослин і здебільшого об'єктивно характеризує їхній фізіологічний стан (Gill, Tuteja, 2010; Batsmanova et al., 2014). У деревних рослин внаслідок такого стресового впливу відбуваються пригнічення фізіолого-біохімічних процесів і зміни в анатомо-морфологічній будові органів, що може призводити до зниження їхньої фізіологічної стійкості, декоративних якостей і зменшення рекреаційної ефективності насаджень (Hlukhov et al., 2006; Gladkov, 2007; Zubrovska, Gryshko, 2016). На сьогодні комплексні

дослідження фізіологічного та функціонального стану деревних насаджень поблизу промислових підприємств, на жаль, досить обмежені. Вони стосуються переважно або визначення впливу важких металів на перебіг процесів пероксидації, або встановлення морфологічних проявів дії поллютантів на асиміляційні органи. Натомість, особливий науково-практичний інтерес викликає з'ясування особливостей акумуляційної здатності листків деревних рослин на різних стадіях їхнього морфогенезу, інтенсивності окисдаційних процесів і рівня ураження вегетативних органів внаслідок стресової дії важких металів. Дослідження цих процесів дозволять визначити придатність видів для озеленення промислових територій. Тому мета роботи полягала в оцінці інтенсивності вільнорадикальних реакцій у листках деревних рослин за різного рівня акумуляції важких металів як одного з критеріїв функціонального стану деревних насаджень.

## Матеріали та методи

Об'єктами досліджень були 20–30-річні дерева *Populus italica* Moench, *Aesculus hippocastanum* L. і *Betula pendula* Roth., що ростуть у зоні сильного забруднення на промайданчику ПрАТ "Криворізький суриковий завод" (табл. 1) і в дендрарії Криворізького ботанічного саду НАН України (умовний контроль). Для аналізу відбирали листки із середини крони південно-західної експозиції у фазі повного розгортання листової пластинки та на 5–10-ту і 80–85-ту доби фази завершення росту листків, які визначали згідно до загальноприйнятих методів (Metodika..., 1975).

Таблиця 1. Вміст рухомих форм важких металів (амонійно-ацетатна витяжка) у ґрунті поблизу Криворізького сурикового заводу, мг/кг

Table 1. Content of mobile forms of some heavy metals (ammonium acetate extract) in soil near Kryvyi Rih Minium Plant, mg/kg

Зона забруднення	Відстань від джерела емісії, м	Напрямок вітру	Zn	Ni	Pb	Cd
			M±m	M±m	M±m	M±m
Сильне забруднення	50–150	південно-західний	63,92±0,49	9,00±0,42	6,13±0,31	2,12±0,08
		північно-східний	25,78±0,07	3,00±0,14	4,27±0,18	0,78±0,15
		східний	22,39±0,19	2,87±0,25	3,98±0,43	0,65±0,05
Слабке забруднення	250–500	південно-західний	43,07±2,31	2,52±0,01	4,05±0,02	1,47±0,01
		північно-східний	18,45±0,97	1,25±0,05	2,65±0,07	0,44±0,05
		східний	12,85±0,75	0,98±0,01	2,08±0,01	0,40±0,04
Слідові концентрації забруднювачів	1000–2000	південно-західний	12,81±0,86	1,50±0,12	0,66±0,05	0,71±0,05
		північно-східний	8,35±0,52	0,48±0,25	0,42±0,04	0,38±0,03
		східний	6,27±0,08	0,25±0,10	0,35±0,10	0,27±0,05

За даними центральної заводської лабораторії Криворізького сурикового заводу при виготовленні сурику залізного в атмосферне повітря разом з пиловими викидами потрапляють такі важкі метали, як Fe, Zn, Pb, Cd, Ni та Cr. Проведені нами раніше визначення токсикантів у ґрунтах на різній відстані від підприємства (Gryshko et al., 2012) дозволили виокремити зони з різним рівнем забруднення (табл. 1).

Вміст важких металів у рослинному матеріалі визначали з використанням атомно-абсорбційного спектрофотометра С-115 (Україна) за загальноприйнятими методами (Metodicheskie..., 1989). Показники внутрішньотканинного забруднення рослин розраховували по відношенню вмісту елементу в листках рослин за умов забруднення до вмісту елементу в контрольних рослин за В.Б. Ільїним (Ilin, Stepanova, 1979). Визначення вмісту ТБК-активних продуктів проводили на спектрофотометрі СФ-2000 (Росія) за В.С. Камишніковим (Kamyshnikov, 2000), білку – за Х.С. Грінберг (Greenberg, Gaddock, 1982) за реакцією з бромфеноловим синім.

Функціональний стан деревних рослин оцінювали за методикою Л.І. Мовсесян (Movsesyan et al., 1978) у модифікації В.М. Гришка (Gryshko et al., 2002). Якісний стан деревних насаджень визначали за <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02>, де стан дерев оцінюється як: добрий – дерева здорові, нормально розвинуті, листя густе, рівномірно розміщене на гілках, листя чи хвоя нормального розміру і забарвлення, немає ознак хвороб і шкідників, ран, пошкоджень стовбура і скелетних гілок, а також дупел; задовільний – дерева здорові, але з ознаками вповільненого росту, з нерівномірно розвиненою кроною, на гілках мало листя, є незначні механічні пошкодження і невеликі дупла; незадовільний – дерева дуже ослаблені, стовбури викривлені, крони слабкорозвинені, є сухі та гілки, що засихають, приріст однорічних пагонів незначний, механічно пошкоджені стовбури, є дупла. Сумарний бал ураження рослин характеризує загальний функціональний стан виду за певних умов: 0–1 бал – рослини пригнічені не істотно, стан насаджень добрий; 1,0–1,5 бала – рослини зменшують декоративні якості, насадження потребують ретельного догляду; 1,5–2,0 бала – рослини пригнічені, декоративність значно знижується, необхідна часткова реконструкція

насаджень; понад 2 бали – рослини знаходяться на різних стадіях відмирання, необхідна часткова чи повна реконструкція насаджень.

Повторність у межах окремого варіанту досліду складала 10 рослин, аналітична повторність 4-кратна. Експериментальні дані статистично обробляли за загальноприйнятими методами параметричної статистики при 95%-му рівні значущості за Б.А. Доспеховим (Dospikhov, 1985).

## Результати та обговорення

Узагальнені розрахунки показників внутрішньотканинного забруднення листків важкими металами за промислових умов (рис. 1, А) свідчать про те, що в листках *Populus italica* найбільше серед усіх досліджених політантів накопичувався Цинк, який належить до класу високонебезпечних сполук і має переважно фоліарний шлях надходження в деревні рослини (Giniyatullin, 2007; Gladkov, 2007). Стосовно високого ступеня накопичення Цинку в рослинах відомо, що він є типовим елементом-біофілом, котрий бере участь у багатьох процесах метаболізму. Тому його розчинні форми доступні для рослин, а поглинання відбувається шляхом активного транспорту через клітинну мембрану за допомогою білків-переносників (CDF- та ZIP-транспортерів) (Guillermo, Cogliatti, 1998; Emamverdian et al., 2015) і зростає з підвищенням концентрації Цинку в ґрунті (Gladkov, 2007).

Так, протягом морфогенезу листової пластинки вміст Цинку в асиміляційних органах виду у понад 11 разів перевищував показники контрольних рослин, що, ймовірно, пов'язане з видовою специфічністю акумуляції Цинку тополями, а саме з його безбар'єрним надходженням до вегетативних органів (Корюлова, 2012; Vetchinnikova et al., 2013). Аналогічний характер накопичення Цинку був встановлений В. Тодешіні зі співавторами (Todeschini et al., 2011) для тополь у зоні дії викидів хімічного заводу. Як видно (див. рис. 1, А), *P. italica* інтенсивно накопичує в листках ще й Кадмій, що, ймовірно, пов'язано з ефектами синергізму між іонами Кадмію та Цинку (Крамер et al., 2000).

Слід зазначити, що для рослин *P. italica* характерна висока інтенсивність акумуляції переважної більшості сполук важких металів, тому він віднесений до групи видів з високим рівнем акумуляції токсикантів. Вочевидь, це пов'язано з тим, що текстура поверхні листків тополь, а саме їхня опушеність і наявність смолистих речовин і

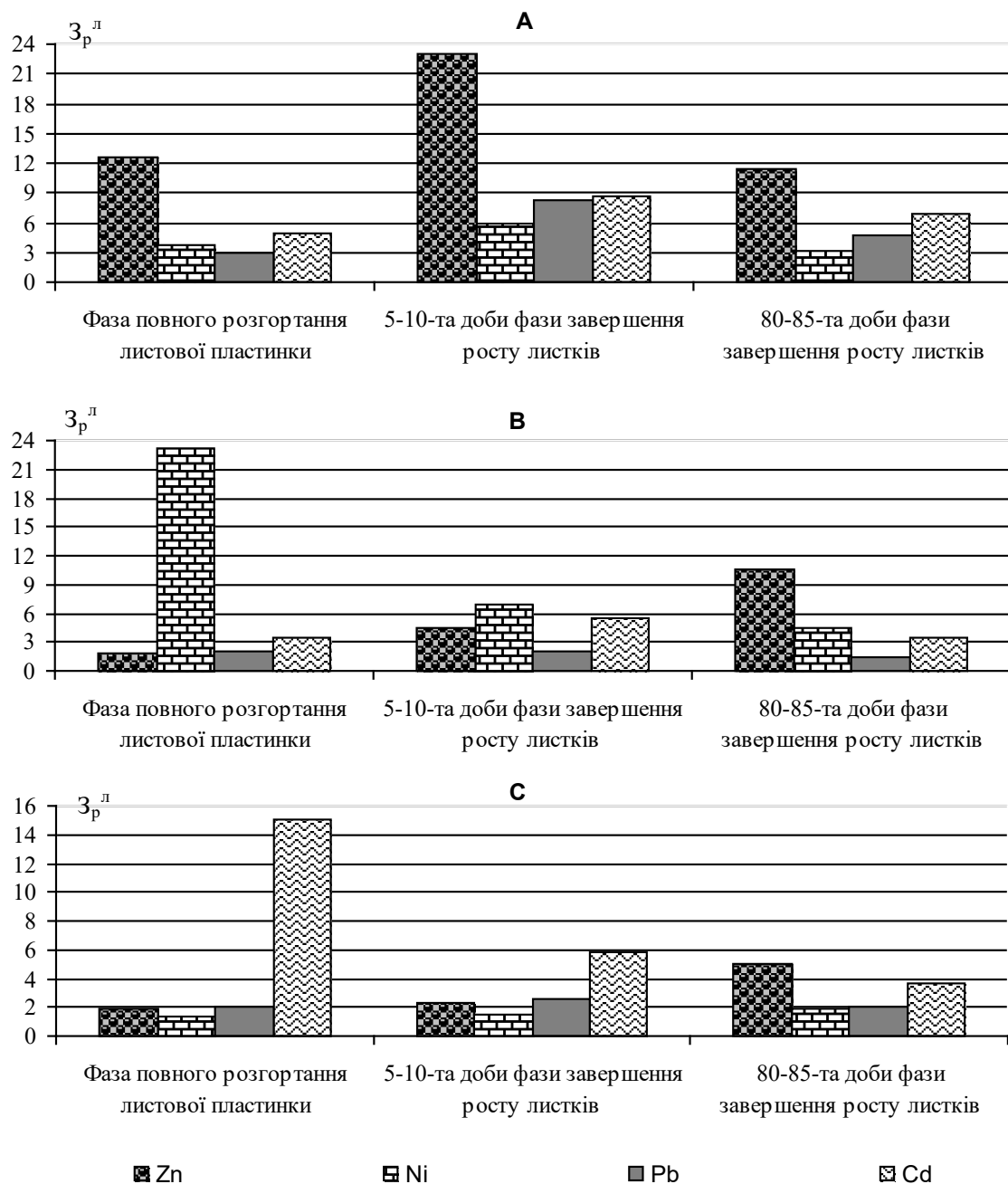


Рис. 1. Індекси внутрішньотканинного забруднення листків ( $Z_p^l$ ) деревних рослин деякими важкими металами за умов сильного забруднення. А: *Populus italica*; В: *Aesculus hippocastanum*; С: *Betula pendula*

Fig. 1. Indices of intratissue contamination of woody plants leaves ( $Z_p^l$ ) by some heavy metals under conditions of severe pollution. A: *Populus italica*; B: *Aesculus hippocastanum*; C: *Betula pendula*

терпенів сприяють більш інтенсивному налипанню пилових часток, які містять сполуки важких металів і, як наслідок, більшому фоліарному проникненню токсичних елементів до органів асиміляції (Giniyatullin, 2007; Zubrovska, Gryshko, 2017).

За промислових умов у *Aesculus hippocastanum* і *Betula pendula*, які були віднесені до групи видів з низьким акумуляційним потенціалом, коефіцієнт біологічної акумуляції Цинку та Плюмбуму як у період повного розгортання листової пластинки, так і на 5–10-ту добу фази завершення росту листків не перевищував 4,2 (рис. 1, В, С), що ймовірно, пояснюється антагоністичною дією між іонами Цинку та Плюмбуму (Gladkov, 2007). Проте, вже на 80–85-ту добу фази завершення росту листків показник внутрішньотканинного забруднення Цинком в асиміляційних органах першого виду зростав у понад 9 разів.

Зазначимо, що *A. hippocastanum* у зоні сильного забруднення ПрАТ "Криворізький суриковий завод" упродовж всього морфогенезу листків найактивніше накопичував Нікель (рис. 1, В). Натомість показники внутрішньотканинного забруднення даним елементом у листках *B. pendula* не суттєво перевищували такі у контрольних рослин (рис. 1, С).

На відміну від *A. hippocastanum*, для *B. pendula* характерне інтенсивне накопичення Кадмію як у фазі повного розгортання листової пластинки, так і на 5–10-ту та 80–85-ту доби фази завершення росту листків (у 15; 6 і 4 рази відповідно більше за контроль). Подібна тенденція щодо інтенсивної акумуляції Кадмію в листках *B. pendula* відмічена у ряді робіт (Giniyatullin, Kulagin, 2009; Vetchinnikova et al., 2013). Цими авторами встановлено, що в умовах забруднення промислових центрів півночі Росії даний вид належить до видів-накопичувачів Кадмію.

Не зважаючи на те, що *A. hippocastanum* серед досліджуваних важких металів найактивніше концентрував у своїх листках Нікель, а *B. pendula* – Кадмій, темпи їхньої акумуляції з часом зменшувалися (рис. 1). Зниження концентрації важких металів у листках рослин є багатофакторним процесом, до якого може призвести, по-перше, активний ріст і потовщення листової пластинки (збільшення її фітомаси), по-друге, формування протягом морфогенезу листової пластинки повноцінного кутикулярного шару, який перешкоджає процесам інтенсивного надходження токсикантів у листки з повітря.

Відомо, що токсична дія більшості важких металів спричинює розвиток оксидативного стресу і супроводжується перебудовами метаболізму рослин, обумовленими як безпосереднім окисненням ліпідів мембран, так і накопиченням продуктів пероксидації, особливо вторинних (Clemens, 2006; Batsmanova et al., 2014). Кількість саме сполук тіобарбітурової кислоти (ТБК-активних метаболітів) вважається важливим показником впливу різних факторів на організм, що дозволяє оцінити функціональний стан рослин та їхню неспецифічну адаптаційну здатність (Foyer, Shigeoka, 2011). У сучасних дослідженнях (Khromykh et al., 2013; Fathi, Varagi Tari, 2016), наприклад, порівнюється можливість використання показників вмісту вторинних продуктів пероксидації, активності антиоксидантних ферментів та співвідношення хлорофілів у листках рослин як маркерів стресової дії гербіцидів та ґрунтової посухи.

Представлені в табл. 2 результати свідчать про те, що підвищений вміст важких металів у листках деревних рослин за сильного забруднення індукує збільшення кількості ТБК-активних сполук. Однак, рівень їхньої концентрації в більшості випадків залежав від концентрації поллютантів в асиміляційних органах та ефективності функціонування фізіолого-біохімічних систем захисту.

Наприклад, в асиміляційних органах *P. italica* впродовж морфогенезу листків рівень вторинних метаболітів пероксидного окиснення ліпідів виявився найнижчим і не перевищував контрольні показники більше, ніж у 1,4–1,8 раза. Напевно, це пов'язано з підвищеною інтенсивністю функціонування антиоксидантних систем, зокрема циклу Халівала-Асада, та високим рівнем біосинтезу фітохелатинів і металотеонеїнів (Yang, Chu, 2011). Так, у наших попередніх дослідженнях (Danilchuk, Gryshko, 2003) показано, що в *P. italica* за меншого рівня забруднення важкими металами для захисту клітин асиміляційних органів використовується переважно аскорбінова кислота, тоді як за високого – ще й глутатіон. Натомість у листках *B. pendula* та *A. hippocastanum* кількість ТБК-активних сполук перевищувала показники контролю відповідно в 2,7 і 2,9 раза на різних фазах морфогенезу листків, що у першого виду, вочевидь, викликане значними темпами біологічної акумуляції Кадмію, а в другого –

Таблиця 2. Вміст ТБК-активних продуктів у листках деревних рослин за комплексної дії важких металів ( $10^{-6}$  М МДА/мг білка)

Table 2. Content of TBA-active products in woody plant leaves under combined effect of heavy metals ( $10^{-6}$  M MDA/mg protein)

Моніторингова ділянка	Фаза повного розгортання листової пластинки		5–10-та доби фази завершення росту листків		80–85-та доби фази завершення росту листків	
	M±m	% до контролю	M±m	% до контролю	M±m	% до контролю
<i>Populus italica</i>						
Умовний контроль	2,64±0,04	—	2,94±0,23	—	4,79±0,09	—
Зона сильного забруднення	3,68±0,21*	139,2	4,48±0,17*	152,3	8,49±0,23*	177,2
<i>Aesculus hippocastanum</i>						
Умовний контроль	2,47±0,05	—	2,51±0,25	—	3,67±0,14	—
Зона сильного забруднення	6,27±0,20*	253,8	6,80±0,04*	270,4	7,21±0,17*	195,9
<i>Betula pendula</i>						
Умовний контроль	4,93±0,28	—	5,08±0,16	—	5,46±0,35	—
Зона сильного забруднення	12,74±0,24*	258,6	13,87±0,18*	273,1	16,02±0,51*	292,7

\*Статистично значуща різниця відносно контролю за критерієм Стьюдента при  $p < 0,05$ .

Нікелю. Це підтверджується сильним позитивним кореляційним зв'язком між вмістом важких металів і рівнем вторинних метаболітів у межах від  $r = +0,95$  до  $r = +1,00$ . Цей факт, відповідно, обумовлює інтенсифікацію утворення вільних радикалів, які посилюють процеси пероксидації, що, ймовірно, призводить до виснаження певних ланок антиоксидантного захисту рослинної клітини (Danilchuk, Gryshko, 2003; Chipilyak, Gryshko, 2014; Ryazanova et al., 2015).

Довготривала стресова дія важких металів і розвиток індукованого ними пероксидного окиснення ліпідів спричинювала суттєві візуальні пошкодження органів деревних рослин. Узагальнену їхню закономірність у нашому дослідженні відображає оцінка функціонального стану насаджень деревних рослин.

Якісний стан насаджень *P. italica* на обох моніторингових ділянках оцінювався як добрий та задовільний (табл. 3). Декоративність рослин в умовному контролі є високою, в зоні сильного забруднення — середньою. Пошкодження некрозами і хлорозами листків *P. italica* в зоні сильного забруднення ПрАТ "Криворізький суриковий завод" збільшувалося до 10%, а ураження шкідниками перевищувало контрольні показники на 15% (табл. 3, рис. 2, А, В).

Як показано вище, високий ступінь біологічної акумуляції важких металів у листках *P. italica* в зоні сильного забруднення не призводив до істотного посилення вільнорадикальних реакцій, тому видимих симптомів погіршення морфометричних характеристик листової пластинки практично не спостерігалось. Очевидно, що стійкість рослин

виду до впливу токсикантів забезпечується розвитком захисних адаптаційно-присосувальних реакцій метаболізму, насамперед за рахунок дії антиоксидантних систем та змін у структурі поверхневого шару кутикули листків. Такої думки дотримуються й інші дослідники, що вивчали пристосувальні зміни листків роду *Populus* до дії надлишкових концентрацій важких металів (Geraskin et al., 2011; Danilchuk, Gryshko, 2012).

У промислових умовах пошкодження стовбуру *P. italica* морозобійними тріщинами було незначним, а їхня площа меншою вчетверо порівняно з іншими досліджуваними видами. Лише 20% особин виду в зоні сильного забруднення мали незадовільний якісний стан і низький рівень декоративності та відзначалися сувоверхістю й всиханням скелетних гілок (табл. 3).

Насадження *A. hippocastanum* за умов контролю мали добрий та задовільний якісний стан, хоча порівняно з іншими видами більше пошкоджувалися шкідниками, зокрема мінуючою міллю каштановою (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986). Однак останнє є типовим пошкодженням асиміляційних органів цього виду за останні роки в Україні й Західній Європі (Hamanova, 2013; Oszmiański et al., 2014). До того ж на стовбурах були відмічені невеликі морозбійні тріщини загальною площею до 25 см<sup>2</sup> (табл. 3). З огляду на значне пошкодження органів асиміляції шкідниками, рослини вже в першій декаді червня втрачають декоративність, тому зазначений вид не можна розглядати як перспективний для створення ефективних зелених насаджень у містах України.

Таблиця 3. Оцінка функціонального стану насаджень деревних рослин за різного рівня забруднення важкими металами

Table 3. Assessment of the state of tree plantation under conditions of various levels of heavy metal pollution

Моніторингова ділянка	Інтенсивність ураження чи пошкодження												3	Якісний стан	Σ
	Стовбур				Гілки		Листки								
	мокрий судинний бактеріоз / морозбійні тріщини		ракові хвороби		гниль та судинні мікози		хлороз		некроз		шкідники				
	см <sup>2</sup>	бал	см <sup>2</sup>	бал	%	бал	%	бал	%	бал	%	бал			
<i>Populus italica</i>															
Умовний контроль	–	0	–	0	2,7	0,1	5,4	0,5	7,8	0,3	2,0	0,3	3,2	д/з – 100	0,4
Зона сильного забруднення	– / 25,0	1,3	60,0	2,0	18,7	0,9	12,0	1,0	16,5	0,6	17,0	1,5	16,5	д/з – 90 н – 10	1,3
<i>Aesculus hippocastanum</i>															
Умовний контроль	– / 25,0	1,3	–	0	3,1	0,2	7,5	0,7	11,3	0,5	15,0	1,3	3,5	д/з – 100	0,7
Зона сильного забруднення	– / 125,0	2,3	–	0	10,5	0,6	58,0	3,0	21,0	0,8	45,6	3,0	41,0	д/з – 40 н – 60	1,9
<i>Betula pendula</i>															
Умовний контроль	– / 24,0	1,3	–	0	2,7	0,2	5,0	0,5	10,0	0,5	2,0	0,2	3,2	д/з – 100	0,6
Зона сильного забруднення	– / 100,0	1,7	120,0	3,0	23,0	0,7	40,0	2,7	51,0	2,0	10,0	1,0	45,0	д/з – 40 н – 60	1,9

"–" пошкодження відсутнє; 3 – зрідженість крони; якісний стан: д – добрий, з – задовільний, н – незадовільний; Σ – сумарний бал ураження.

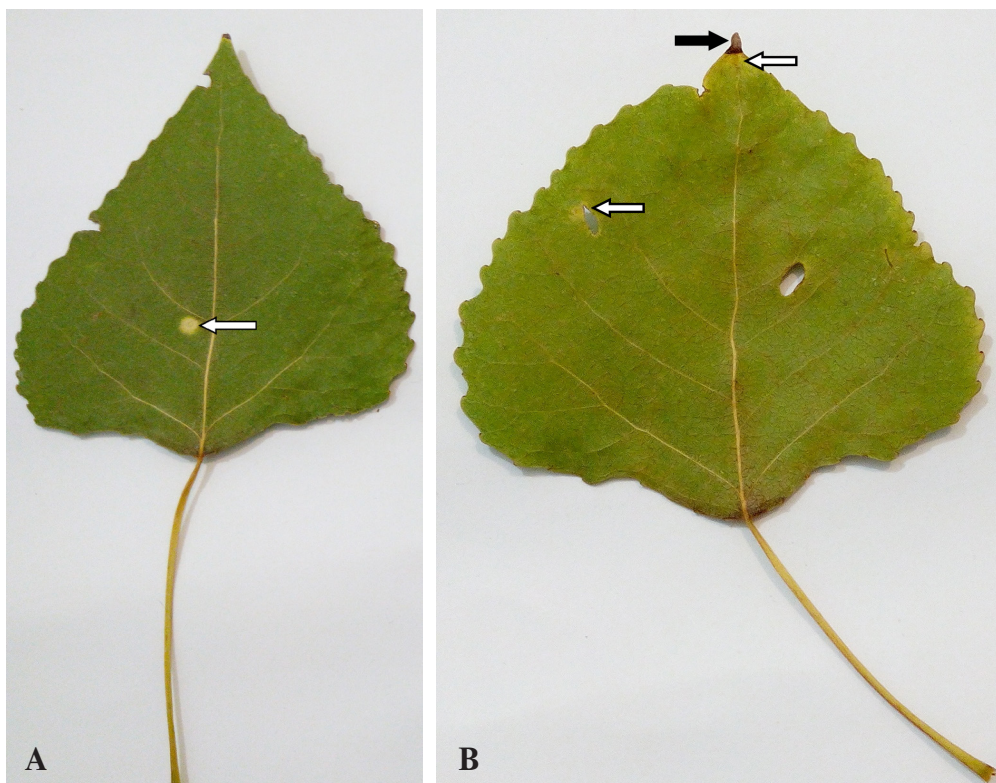


Рис. 2. Ураження листків *Populus italica* хлорозами (біла стрілка) і некрозами (чорна стрілка) у контролі (А) та в зоні сильного забруднення ПрАТ "Криворізький суриковий завод" (В)

Fig. 2. Leaves of *Populus italica* damaged by chlorosis (white arrow) and necrosis (black arrow) under the control conditions (A) and in the zone of severe contamination by the Kryvyi Rih Minium Plant (B)

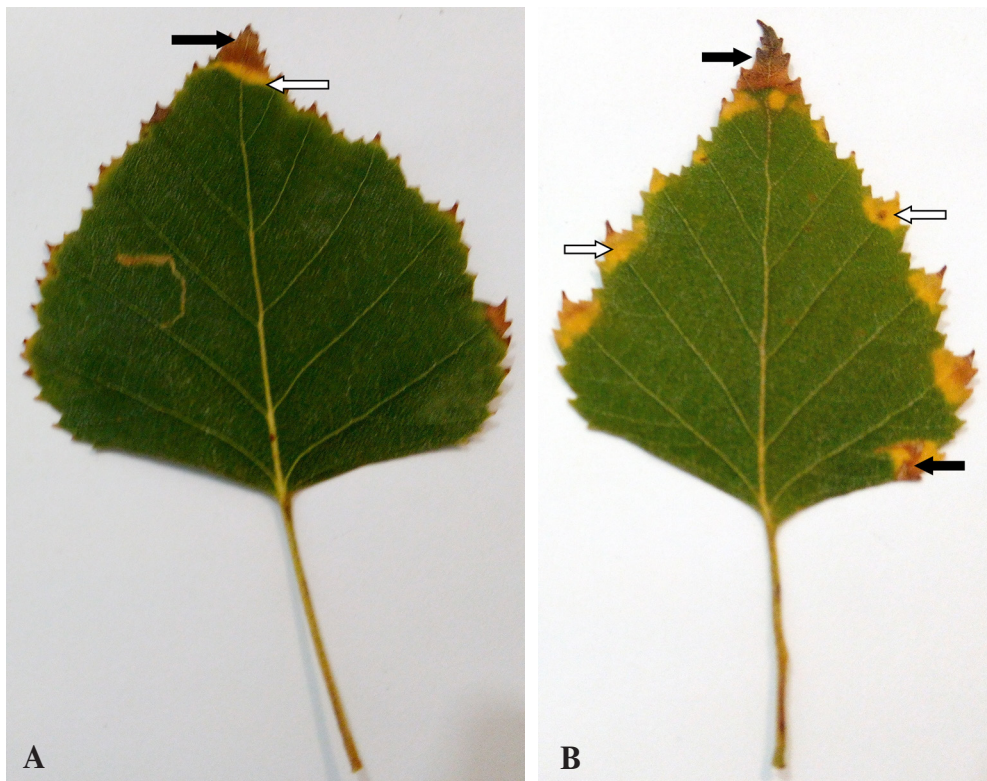


Рис. 3. Ураження листків *Betula pendula* хлорозами (біла стрілка) і некрозами (чорна стрілка) у контролі (А) та в зоні сильного забруднення ПрАТ "Криворізький суриковий завод" (В)

Fig. 3. Leaves of *Betula pendula* damaged by chlorosis (white arrow) and necrosis (black arrow) under the control conditions (A) and in the zone of severe contamination by the Kryvyi Rih Minium Plant (B)

На забрудненій території атмосферні викиди промислового підприємства найсуттєвіше впливали на візуальний стан листків. Так, хлоротичними плямами уражалось понад 50% асиміляційних органів (майже у 8 разів перевищувало контрольні показники), що призводило до зменшення загальної кількості пігментів та активної фотосинтезуючої площі. Головною причиною зниження вмісту основних пігментів фотосинтезу в присутності важких металів є пригнічення біосинтезу хлорофілів, пов'язане, в першу чергу, з безпосередньою дією іонів металів (у нашому випадку Нікелю та Кадмію) на активність ферментів та розвитком вільнорадикальних реакцій у клітинах листків. Опосередковану дію металів на біосинтез хлорофілів, на думку деяких вчених, можна пояснити незбалансованим забезпеченням рослин біофільними елементами або їхнім дефіцитом (Norvath et al., 1995; Koshkin et al., 2012).

Кількість скелетних гілок *A. hippocastanum*, уражених гнилями та судинними мікозами, втричі

перевищувала таку в контролі (табл. 3). Також на стовбурах відмічена найбільша площа морозобоїн (у середньому 125 см<sup>2</sup>). Для рослин характерною була суховерхість і зрідженість крони в понад 40%. Загалом насадження *A. hippocastanum* мали незадовільний стан і низьку декоративність.

Рослини *B. pendula* за контрольних умов характеризувалися добрим якісним станом і були високодекоративними, що підтверджує й низький сумарний бал ураження рослин у насадженнях, який не перевищував 0,6 (табл. 3). Проте відмітимо, що високий ступінь забруднення, характерний для великих промислових міст, призводить до послаблення загального стану рослин *B. pendula*, їхнього передчасного старіння, зниження продуктивності, ураження хворобами й пошкодження шкідниками, всихання та загибелі.

Деякі автори (Ikun, 1978; Bashmakov, Lukatkin, 2009) відносять *B. pendula* до чутливих видів по відношенню до багатьох забруднювачів. Інші вказують на той факт, що за умов техногенного



навантаження вже на початку вегетації *Betula pendula* та *B. czerepanovii* іони Нікелю та Кадмію проявляють токсичну дію на процеси мітотичних поділів клітин в апексах бруньок пагонів, а також на наступні стадії їхньої проліферації (Erofeeva, Naumova, 2010; Lukina, Vasilevskaya, 2012). У подальшому це призводить до зменшення розмірів листових пластинок і пригнічення їхньої функціональної активності.

Нами встановлено, що послаблення життєвого стану *B. pendula* в зоні сильного забруднення виявилось, насамперед, у високому (у 8 разів більше за контроль) ураженні листків некрозами та крайовими хлорозами (табл. 3, рис. 3, В). Необхідно зауважити, що у *B. pendula*, як і у *A. hippocastanum*, стресова дія важких металів, а саме Кадмію та Нікелю, призводила до суттєвішого утворення активних форм кисню, ніж їхнє елімінування, внаслідок чого порушувалася рівновага між процесами пероксидації та функціонування захисних систем організму, що проявлялося в зміні вмісту пігментів у листках і розвитку хлоротичних і некротичних плям. Стовбур більшості особин був пошкоджений великими й глибокими морозобійними тріщинами загальною площею в середньому 100 см<sup>2</sup>. Отже, насадження з *B. pendula* в промислових умовах мали незадовільний якісний стан та були значно пригнічені.

## Висновки

В умовах промислового забруднення виявлена видоспецифічна закономірність акумуляції важких металів у листках деревних видів. Так, для *Populus italica*, порівняно з іншими, характерною була висока інтенсивність акумуляції переважної більшості сполук важких металів, серед яких впродовж усього розвитку листків максимально інтенсивно накопичувався Цинк. Натомість *Aesculus hippocastanum* у фазі повного розгортання листової пластики найактивніше накопичував Нікель, а *Betula pendula* – Кадмій. Рівні інших токсикантів у листках останніх двох видів не перевищували такі в контрольних рослин більше, ніж учетверо.

За умов забруднення важкими металами у *B. pendula* і *A. hippocastanum* встановлено підвищення в понад удвічі відносно контролю концентрації ТБК-активних сполук, яке узгоджується з високим рівнем ураження листків хлорозами і некрозами та максимальним серед досліджуваних видів

сумарним балом ушкодження. Тоді як для *P. italica*, у якого кількість ТБК-активних метаболітів зростала лише на 52%, характерним було менш значне ураження листків і найменший сумарний бал ушкоджень рослин. Тобто, вміст ТБК-активних продуктів в асиміляційних органах рослин може слугувати критерієм функціонального стану видів у зелених насадженнях.

Довготривала дія важких металів у надлишкових концентраціях призводила до візуальних пошкоджень органів деревних рослин. *Populus italica* в промислових умовах виявився відносно стійким. Натомість у *A. hippocastanum* і *B. pendula* листки у 8 разів більше за контроль уражалися некрозами й хлорозами, на стовбурах зустрічалися на 20–25% більші за розмірами морозобійні тріщини, скелетні гілки вражалися судинними гнилями, а зрідженість крони становила понад 40%. Рослини даних видів характеризувалися незадовільним якісним станом у 30–60% особин і знаходилися на різних стадіях відмирання чи були значно пригнічені. Їхні насадження потребують часткової або повної реконструкції.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. 2009. *Ekologo-fiziologicheskie aspekty akkumulyatsii i raspredeleniya tyazhelykh metallov u vysshikh rasteniy*. Ed. A.S. Lukatkin. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 236 pp. [Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. 2009. *Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений*. Ред. А.С. Лукаткин. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 236 с.]
- Batsmanova L., Taran N., Okanenko A., Kosyan A. 2014. Oxidation stress is adaptative reaction inductor of winter wheat varieties. *Agriculture (Polnohospodarstvo)*, 60(2): 70–76.
- Chipilyak T.F., Gryshko V.M. 2014. *Ukrainian Botanical Journal*, 71(5): 614–619. [Чипиляк Т.Ф., Гришко В.М. 2014. Особливості фізіологічної адаптації *Hemerocallis lilioasphodelus* і *H. middendorffii* (Hemerocallidaceae) до техногенного забруднення. *Український ботанічний журнал*, 71(5): 614–619]. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj71.05.614>
- Clemens S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88: 1707–1719.
- Danilchuk O.V., Gryshko V.M. 2003. *Bulletin Taras Shevchenko National University of Kyiv. Introduction and conservation of plant diversity*, 6: 42–43. [Данильчук О.В., Гришко В.М. 2003. Вміст аскорбінової кислоти та глутатіону у тополі в умовах забруднення важкими металами. *Вісник Київського національного університету. Інтродукція та збереження рослинного різноманіття*, 6: 42–43].

- Danilchuk O.V., Gryshko V.N. 2012. *Agrobiologia*, 8(94): 57–60. [Данильчук О.В., Гришко В.М. 2012. Оцінка стану насаджень тополь на промислових майданчиках гірничорудних підприємств. *Агробіологія: Збірник наукових праць*, 8(94): 57–60].
- Dospikhov V.A. 1985. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy)*. Moscow: Agropromizdat, 351 pp. [Доспехов В.А. 1985. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат, 351 с.].
- Emamverdian A., Ding Yu., Mokhberdoran F., Xie Yi. 2015. Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*. Article ID 756120, 18 pp. <http://doi.org/10.1155/2015/756120>
- Erofeeva E.A., Naumova M.M. 2010. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series Biologiya*, 1: 140–143. [Ерофеева Е.А., Наумова М.М. 2010. Взаимосвязь физиолого-морфологических показателей листовой пластинки берёзы повислой с содержанием в ней тяжелых металлов. *Вестник Нижегородского университета. Серия Биология*, 1: 140–143].
- Fathi A., Barari Tari D. 2016. Effect of Drought Stress and its Mechanism in Plants. *International Journal of Life Sciences*, 10(1): 1–6. <http://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14509>
- Foyer C.H., Shigeoka S. 2011. Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. *Plant Physiology*, 155: 93–100.
- Geraskin S., Evseeva T., Oudalova A. 2011. Plants as a tool for the environmental health assessment. *Encyclopedia of Environmental Health. Elsevier Science*, 1: 571–579.
- Gill S.S., Tuteja N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12): 909–930.
- Giniyatullin R.Kh. 2007. *Forestry Bulletin*, 1: 53–56. [Гиниятуллин Р.Х. 2007. Биоконсервация металлов в надземных органах тополя бальзамического в условиях промышленного загрязнения. *Лесной вестник*, 1: 53–56].
- Giniyatullin R.Kh., Kulagin A.Yu. 2009. *News of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN)*, 11(1): 223–227. [Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.Ю. 2009. Экологическая роль березы повислой в ограниченной циркуляции металлов в условиях техногенного загрязнения. *Известия Самарского НЦ РАН*, 11(1): 223–227].
- Gladkov E.A. 2007. *Ecology*, 1: 71–74. [Гладков Е.А. 2007. Влияние комплексного взаимодействия тяжелых металлов на растения мегаполисов. *Экология*, 1: 71–74].
- Greenberg Ch.S., Gaddock Rh.R. 1982. Rapid single step membrane proteine assay. *Clinical Chemistry*, 28(7): 1726–1728.
- Gryshko V.N., Plyuto K.B., Stolyarenkova Z.N. 2002. In: *Rol botanichnykh sadiv v zelenomu budivnytstvi mist, kurtortnykh ta rekreatsinykh zon: materialy mizhnarodnoyi konferentsii*, part 1, Odesa, pp. 126–131. [Гришко В.Н., Плюто К.Б., Столяренко З.Н. 2002. К методике оценки состояния древесных растений в условиях городской среды. У зб.: *Роль ботаничних садів в зеленому будівництві міст, курортних та рекреаційних зон: матеріали міжнародної конференції (м. Одеса, 15–17 травня 2002 р.)*, ч. 1. Одеса, с. 126–131].
- Gryshko V.M., Syshchykov D.V., Piskova O.M., Danylchuk O.V., Mashtaler N.V. 2012. *Vazhki metaly: nadkhodzhennya v grunty, translokatsiya u roslynakh ta ekolohichna nebezpeka*. Donetsk: Donbas, 303 pp. [Гришко В.М., Сишиков Д.В., Піскова О.М., Данильчук О.В., Машталер Н.В. 2012. *Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека*. Донецьк: Донбас, 303 с.].
- Guillermo S.-M.E., Cogliatti D.H. 1998. The regulation of zinc uptake in wheat plants. *Plant Science*, 137(6): 1–12.
- Hamanova O.M. 2013. *Plant protection and quarantine (Zakhyst i karantyn roslyn)*, 59: 45–52. [Гаманова О.М. 2013. Захист гіркого каштана звичайного від каштанової мінуючої молі. *Захист і карантин рослин*, 59: 45–52].
- Hlukhov O.Z., Safonov A.I., Khyzhnyak N.A. 2006. *Fitoindykatsiya metalopresynhu v antropohenno transformovanomu seredovyshchi*. Donetsk: Nord-Press, 360 pp. [Глухов О.З., Сафонов А.І., Хижняк Н.А. 2006. *Фітоіндикація металопресингу в антропогенно трансформованому середовищі*. Донецьк: Норд-Прес, 360 с.].
- Horvath G., Droppa M., Horvath L.J., Szalontai B. 1995. Effects of heavy metal induced stress on the photosynthetic membrane characteristics. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 30(1–2): 127–129.
- Ilkun G.M. 1978. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya*. Kiev: Naukova Dumka, 247 pp. [Илькун Г.М. 1978. *Загрязнители атмосферы и растения*. Киев: Наукова думка, 247 с.].
- Ilin V.B., Stepanova M.D. 1979. *Soil Science (Pochvovedenie)*, 11: 61–67. [Ильин В.Б., Степанова М.Д. 1979. Относительные показатели загрязнения в системе почва–растение. *Почвоведение*, 11: 61–67].
- Instruktsiya z inventaryzatsiyi zelenykh nasadzen' u naselennykh punktakh Ukrainy*. 2007–onward. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02> [Інструкція з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України. 2007. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02>]
- Kamyshnikov V.S. 2000. *Spravochnik po kliniko-biokhimi-cheskoy laboratornoy diagnostike*, vol. 2. Minsk: Belarus, 207 pp. [Камышников В.С. 2000. *Справочник по клинико-биохимической лабораторной диагностике*, т. 2. Минск: Беларусь, 207 с.].
- Khromykh N.O., Rossykhina-Halycha H.S., Lykholat Yu.V. 2013. *Scientific journal of the National Pedagogical University named after M.P. Drahomanov. Series 20. Biology (Naukovyy chasopys Natsional'noho pedahohichnoho universytetu imeni M.P. Drahomanova. Seriya 20. Biologiya)*, 5: 81–88. [Хроміх Н.О., Россихіна-Галича Г.С., Лихолат Ю.В. 2013. Післядія гербіцидної обробки на окисно-відновну активність та вміст

- хлорофілу у рослин пшениці наступної генерації. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. Серія 20. Біологія*, 5: 81–88].
- Kopylova L.V. 2012. *Heavy metals accumulation in tree plants in urban area of Eastern Trans-Baikal*: Cand. Sci. Diss. Abstract. Ulan-Ude, Buryat State University, 23 pp. [Копылова Л.В. 2012. *Накопление тяжелых металлов в древесных растениях на урбанизированных территориях восточного Забайкалья*: автореф. дис. ... канд. биол. наук: спец. 03.02.08 "Экология". Улан-Удэ, Бурятский государственный университет, 23 с.].
- Koshkin E.I., Vagun I.V., Volovik V.T. 2012. *News of the Timiryazev Agricultural Academy (Izvestiya TSKhA)*, 2: 32–42. [Кошкин Е.И., Вагун И.В., Воловик В.Т. 2012. Продуктивность и структура урожая ярового рапса при моноэлементном загрязнении почв тяжелыми металлами. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, 2: 32–42].
- Kraemer U., Pickering I.J., Prince R.C., Raskin I., Salt D.E. 2000. Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi species*. *Plant Physiology*, 122(4): 1343–1353.
- Lukina Yu.M., Vasilevskaya N.V. 2012. *Plant resources (Rastitelnye resursy)*, 48(1): 51–58. [Лукина Ю.М., Василевская Н.В. 2012. Воздействие промышленного загрязнения на строение листа *Betula czerepanovii* (Betulaceae). *Растительные ресурсы*, 48(1): 51–58].
- Metodika fenologicheskikh nablyudeniy v botanicheskikh sadakh SSSR*. 1975. Moscow: GBS AN SSSR, 27 pp. [Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. 1975. Москва: ГБС АН СССР, 27 с.].
- Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metall-ov v pochvakh selkhozugodiy i produktsii rastenievodstva*. 1989. Moscow, 62 pp. [Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. 1989. Москва, 62 с.].
- Movsesyan L.I., Kosoglazov A.A., Oleynikov G.F. 1978. Otsenka ustoychivosti drevesno-kustarnikovykh porod v gorodskikh nasazhdeniyakh k boleznyam i vreditelyam. In: *Novye priemy ozeleneniya gorodov*, issue 156. Moscow: Akademiya Kommunalnogo khozyaistva, pp. 43–47. [Мовсесян Л.И., Косоглазов А.А., Олейников Г.Ф. 1978. Оценка устойчивости древесно-кустарниковых пород в городских насаждениях к болезням и вредителям. В кн.: *Новые приемы озеленения городов*, вып. 156. Москва: Академия коммунального хозяйства, с. 43–47].
- Oszmianski J., Kalisz S., Aneta W. 2014. The content of phenolic compounds in leaf tissues of White (*Aesculus hippocastanum* L.) and Red Horse Chestnut (*Aesculus carea* H.) colonized by the Horse Chestnut Leaf Miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić). *Molecules*, 19: 14625–14636.
- Ramazanova Z.R. 2012. *Adaptive structural and functional features of shoots of woody plants in the conditions of the city of Makhachkala*: Cand. Sci. Diss. Abstract. Makhachkala, Dagestan State University, 26 pp. [Рамазанова З.Р. 2012. *Адаптивные структурно-функциональные особенности побегов древесных растений в условиях г. Махачкалы*: автореф. дис. ... канд. биол. наук: спец. 03.02.08 "Экология (биология)". Махачкала, ГОУВПО "Дагестанский государственный университет", 26 с.].
- Ryazanova M.Ye., Batsmanova L.M., Kovalenko M.S., Mykhal's'ka L.M., Shvartau V.V. 2015. *Plant Physiology and Genetics*, 47(6): 497–504. [Рязанова М.Е., Батманова Л.М., Коваленко М.С., Михальська Л.М., Швартау В.В. 2015. Вплив іонів Міді та рН середовища на антиоксидантну активність у тканинах коренів проростків озимої пшениці. *Физиология растений и генетика*, 47(6): 497–504].
- Sima Gh., Fatemeh Z. 2013. Histological and ultrastructure changes in *Medicago sativa* in response to lead stress. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2(2): 20–29.
- Todeschini V., Lingua G., D'Agostino G., Carniato F., Roccotiello E., Berta G. 2011. Effects of high zinc concentration on poplar leaves: a morphological and biochemical study. *Environmental and Experimental Botany*, 71(1): 50–56.
- Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Titov A.F. 2013. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science (Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN)*, 3: 68–73. [Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. 2013. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера. *Труды Карельского НЦ РАН*, 3: 68–73].
- Yang Z., Chu C. 2011. Towards in understanding plant response to heavy metal stress. In: *Abiotic Stress in Plants – Mechanisms and Adaptations*. Shanghai: InTech, pp. 59–78.
- Zubrovskaya O.M., Gryshko V.M. 2016. *Studia Biologica*, 10(3–4): 47–60. [Зубровська О.М., Гришко В.М. 2016. Видоспецифічні зміни кутикулярних ліпідів і процеси пероксидного окиснення ліпідів у листках деревних рослин у промислових умовах. *Біологічні студії*, 10(3–4): 47–60. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist\\_2016\\_10\\_3-4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist_2016_10_3-4_6)]
- Zubrovskaya O.M., Gryshko V.M. 2017. *Plant Physiology and Genetics*, 49(5): 444–451. [Зубровська О.М., Гришко В.М. 2017. Вплив важких металів на процеси пероксидного окиснення та склад ліпідних компонентів поверхневого шару кутикули листків деревних рослин. *Физиология растений и генетика*, 49(5): 444–451].

Рекомендує до друку О.К. Золотарьова