

УДК: 581.45:547:56:504.5:658 (477.64 – 2 Зп)

Вміст водорозчинних фенолів в листках деревних рослин санітарно-захисних зон заводів промислової зони Запоріжжя

А.В. Скляренко, В.П. Бессонова

Представлені результати вивчення накопичення водорозчинних фенолів в листках деревних рослин санітарно-захисних насаджень промислових підприємств м. Запоріжжя: Титаномагнієвий, Алюмінієвий, Абразивний комбінати, Запоріжсталь, Коксохімічний, Феросплавний, Вогнетрив, Український графіт та Трансформаторний. Встановлено значно більш високий вміст фенольних сполук у рослин, що зростають в техногенних умовах у порівнянні з контролем – «чистою зоною». Найвищі концентрації водорозчинних фенолів виявлені у листках деревних рослин лісосмуги біля Коксохімічного заводу. За рівнем акумуляції в листках дерев санітарно-захисної зони, а, отже, за ступенем забруднення повітря поллютантом підприємства можна ранжувати наступним чином: Коксохімічний > Запоріжсталь ≥ Завод Феросплавів > Вогнетрив > Укрграфіт > Алюмінієвий > Титаномагнієвий комбінат > Абразивний > Трансформаторний завод. Залежно від рівня накопичення фенолів у листках рослини поділені на три групи. Максимальну кількість поллютанта накопичують листки дерев наступних видів: *Ailanthus altissima*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Populus pyramidalis*, *Populus simonii*, *Elaeagnus angustifolia*, найменшу – *Morus alba*, *Robinia pseudoacacia*, *Tilia cordata*, *Ulmus carpiniifolia*, *Armeniaca vulgaris*, *Fraxinus lanceolata*. Проміжне положення між цими двома групами займають: *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Aesculus hippocastanum*, *Catalpa bignonioides*, *Salix alba*, *Ulmus laevis*. Види дерев, які характеризуються найбільшим накопиченням водорозчинних фенолів, можуть бути рекомендовані для оздоровлення атмосферного повітря. За величиною коефіцієнта відносного накопичення фенольних сполук виділені види рослин, які є найбільш інформативними тест-об'єктами забруднення атмосферного повітря. До цих рослин віднесені *Betula pendula*, *Catalpa bignonioides*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ailanthus altissima*, *Populus simonii*, *Acer negundo*, *Ulmus laevis* та *Fraxinus lanceolata*.

Ключові слова: захисні смуги, зелені насадження, забруднення повітря, вміст фенолів, коефіцієнт накопичення поллютанта, фітоіндикатори.

Про авторів:

А.В. Скляренко – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, Дніпро, Україна, 49600, s-k2015@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4954-5007>

В.П. Бессонова – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, Дніпро, Україна, 49600, bessonova18@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4310-0971>

Вступ

До токсичних широко розповсюджених інгредієнтів промислових викидів належать феноли (Lin et al., 2008; Gami et al., 2014). Атмосферне повітря фенолами забруднюють коксохімічні виробництва, заводи пластмас, газогенераторні станції, деревообробні та меблеві підприємства (Поліщук та ін., 2012). Не менш небезпечні феноли, які утворюються в атмосфері з вихлопних газів неповного згоряння в результаті хімічних реакцій, а також при пожежах. Присутність фенолів в екосистемах також пов'язана з виробництвом і деградацією численних пестицидів (Michałowicz, Duda, 2007).

Ці забруднювачі є токсичними для людини і тварин (Klimov, Basilaia, 2017). Вони мають канцерогенну дію (Бахитова, Пашин, 1982; Lin et al., 2008; Gami et al., 2014; Ghorani-Azam et al., 2016). Тому необхідно використовувати різні методи очищення повітря від фенольних сполук.

Рослини здатні не тільки локалізувати й нейтралізувати токсичні компоненти промислових викидів, а навіть здійснювати їх детоксикацію (Илькун, 1978; Сергейчик, 1984; Гетко, 1989; Wei et al., 2017). Саме рослинні організми підтримують гомеостаз багатьох факторів у біосфері й забезпечують її функціонування.

Слід зазначити, що масштаби природнього самоочищення довкілля за допомогою рослин в повній мірі ще не оцінені. Для того щоб належним чином захистити оточуюче середовище від поллютантів, необхідний значний об'єм знань з накопичення їх в органах різних видів рослин та із середовищевірної ролі рослинних організмів за певних умов зростання.

Мета даного дослідження – визначити здатність листків різних видів деревних рослин зелених насаджень санітарно-захисних зон акумулювати феноли та встановити найбільш інформативні індикатори забруднення довкілля цим поллютантом.

Матеріали і методи

Дослідження здійснювали в зелених масивах ряду підприємств м. Запоріжжя: Запорізький титано-магнієвий комбінат (Титаномагнієвий), ПАТ «Запорізький виробничий алюмінієвий комбінат» (Алюмінієвий), ПАТ «Запоріжжюк» (Коксохімічний), ПАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь»» (Запоріжсталь), ПАТ «Запорізький завод феросплавів» (Феросплавний), які належать до першого класу шкідливості, ПАТ «Запорізький абразивний комбінат» (Абразивний) – другого, «Закрите акціонерне товариство Вогнетрив-СОЮЗ» (Вогнетрив) – третього, ПАТ «Український графіт» (Укрграфіт), ПАТ «Запоріжтрансформатор» (Трансформаторний) – четвертого. Надалі будуть використані переважно скорочені назви цих підприємств.

Такі підприємства, як Алюмінієвий, Коксохімічний, Запоріжсталь, Феросплавний, Укрграфіт, Вогнетрив та Титаномагнієвий розташовані в заводському районі, утворюючи промисловий комплекс. На відстані від цієї групи підприємств знаходяться Титаномагнієвий (3 км), Абразивний комбінат (6 км) та Трансформаторний завод (8 км). За контрольну ділянку використовували лісосмугу, що знаходиться на відстані 12 км від джерел забруднення.

Для дослідження обрали ті види деревних рослин, що зростають у всіх або більшості зелених масивів біля промислових підприємств, і частка яких у насадженнях достатньо велика: *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L., *Aesculus hippocastanum* L., *Ailanthus altissima* Mill., *Armeniaca vulgaris* Lam., *Betula pendula* Roth., *Catalpa bignonioides* Walter, *Elaeagnus angustifolia* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh., *Juglans regia* L., *Morus alba* L., *Populus alba* L., *Populus nigra* L., *Populus pyramidalis* Borkh., *Populus simonii* Carr., *Robinia pseudoacacia* L., *Salix alba* L., *Tilia cordata* Mill., *Ulmus carpiniifolia* Rupp., *Ulmus laevis* Pall. На кожній ділянці було обрано 5 модельних дерев однієї вікової категорії кожного виду. Листки для визначення фенолу відбирали з південно-східного боку крони на висоті 2 м від поверхні ґрунту в однакових умовах освітлення. Використовували перші 3 листки від основи однорічних пагонів. Водорозчинні феноли визначали з водного екстракту фітомаси методом (Swain, Hillis, 1959), з реактивом Фолина-Чокальтеу, який включає солі фосфорновольфрамової та фосфорномолібденової кислот. У лужному середовищі ці солі при взаємодії з фенольними сполуками відновлюються з утворенням синіх комплексів, вміст яких оцінюється спектрофотометрично. Для побудови калібрувального графіка використовували розчин галової кислоти. Оптичну щільність реакційної суміші визначали на спектрофотометрі СФ-2000 при довжині хвилі 765 нм.

Коефіцієнт відносного накопичення полютанту розраховували як відношення вмісту фенольних сполук в листках рослин у районі забруднення до їх вмісту в контролі – «чистій зоні».

Визначення фенолів у листках досліджуваних видів рослин санітарно-захисних зон промислових підприємств проводили в чотирьох повтореннях, в таблицях та на графіках представлені середні значення та їх стандартні похибки. Статистичний аналіз даних здійснювали з використанням програмного забезпечення Statistica 6.0 за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) і застосовували критерій достовірної різниці групових середніх Тьюкі.

Результати і обговорення

Для виявлення періоду найбільшого накопичення водорозчинних фенолів в листках деревних рослин визначали динаміку цього процесу в контрольному варіанті і в умовах санітарно-захисної зони Коксохімічного заводу, де спостерігається найбільша забрудненість атмосферного повітря фенольними сполуками. Саме технологія виготовлення коксу сприяє значному надходженню в оточуюче середовище цього забруднювача (Кипоть и др., 1976; Поліщук та ін., 2012; Долина та ін., 2013; Полторацька, 2014).

У контрольному варіанті перший максимум кількості водорозчинних фенолів у листках виявлено в період закінчення їх росту (червень), після чого відбувається деяке зниження вмісту цих сполук з наступним зростанням і другим максимумом в старих листках в кінці вегетації (рис. 1а). Слід зазначити, що у роботі Л.М.Кавеленової зі спів. (Кавеленова и др., 2001) вказується, що максимальний вміст водорозчинних фенолів в листках берези повислої в різних умовах зростання (вологість і щільність ґрунту, освітлення тощо) встановлено в першій-другій декаді травня, далі він знижується з наступним пізньолітньо-осіннім підйомом. В техногенних умовах м. Самари, згідно з даними цих авторів, крива динаміки водорозчинних фенольних сполук також має два максимуми, проте їх кількість мало відрізняється в листках рослин різних дослідних ділянок. Можливо, у точках відбору проб рівень фенольних сполук у повітрі нижчий гранично-допустимих концентрацій, автори статті не вказують на забруднення довкілля фенолами.

За результатами наших досліджень, в умовах забруднення атмосферного повітря спостерігається безперервне поступове збільшення рівня фенолів, але темпи їх акумуляції на різних етапах онтогенезу листків неоднакові (рис. 1б). Найактивніше цей процес відбувається листками у період їх росту. Раніше було показано, що такий забруднювач, як сірка, найбільш інтенсивно накопичується в молодих листках, що вже закінчили ріст (Sklyarenko, Bessonova, 2018). І хоча вміст фенолів у листовій масі зростає безперервно, подальше збільшення їх вмісту відбувається більш повільно. У кінці вегетації листки містять найбільшу кількість водорозчинних фенолів, що узгоджується з даними інших дослідів, які були проведені поблизу джерел забруднення з використанням інших видів деревних рослин (Долгова, Козюкіна, 1972; Тарабрин и др., 1986; Капелюш, Бессонова, 2007). Тому надалі фенолнакопичувальну здатність листків різних видів рослин ми досліджували в кінці вегетаційного періоду.

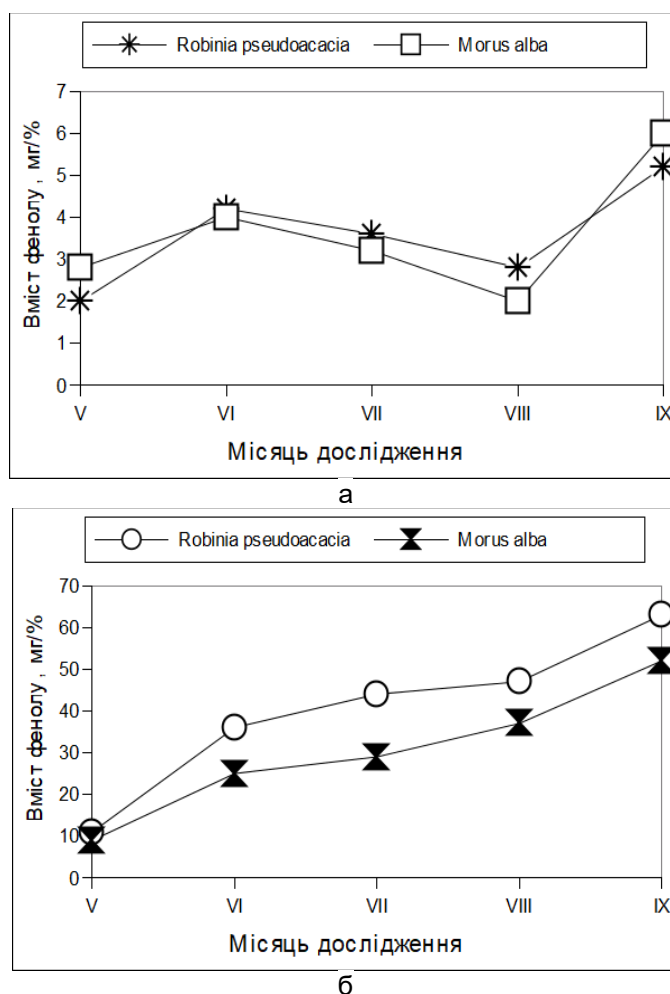


Рис. 1. Динаміка накопичення водорозчинних фенолів в листках (а – контроль, б – дослід)

В таблиці представлені дані вмісту водорозчинних фенолів у листках досліджуваних видів дерев, які зростають як на відносно чистій ділянці, так і у санітарно-захисних зонах промислових підприємств. Їх кількість у рослин контрольного варіанту в кінці вересня варіює від 4,56 до 16,20 мг/% абсолютно сухої маси. Вміст цих сполук в листках рослин всіх досліджуваних насаджень санітарно-захисних зон промислових підприємств перевищує показники контрольного варіанту (різниця статистично достовірна на рівні значимості 0,05), окрім даних для *Juglans regia* та *Populus pyramidalis*, що зростають поряд з Трансформаторним заводом (табл.).

Таблиця.

Вміст фенолів в листках деревних рослин, що зростають в насадженнях санітарно-захисних зон промислових підприємств, мг/% від абсолютної сухої маси ($M \pm m$, $n=4$)

Види рослин	Конт-роль	Промислові підприємства								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Acer negundo</i>	6,00± 0,38 ^a	22,86± 0,52 ^b	43,44± 0,82 ^c	–	–	–	85,86± 1,24 ^d	66,06± 1,02 ^e	–	103,68 ±1,58 ^f
<i>A. platano-ides</i>	6,90± 0,37 ^a	24,24± 0,50 ^b	24,12± 0,52 ^{bc}	19,26± 0,46 ^d	34,56± 0,67 ^e	83,46± 1,21 ^f	86,16± 1,29 ^{fg}	77,64± 1,10 ^h	13,80± 0,48 ⁱ	110,34 ±1,64 ^j
<i>A. hippo-castanum</i>	5,82± 0,32 ^a	16,92± 0,47 ^b	–	11,46± 0,45 ^c	12,84± 0,40 ^{cd}	48,18± 0,87 ^e	43,92± 0,85 ^f	66,36± 1,08 ^g	11,46± 0,45 ^{cd}	54,66± 0,96 ^h
<i>A. altissima</i>	12,66± 0,44 ^a	102,84 ±1,55 ^b	–	–	61,92± 1,03 ^c	178,32 ±2,20 ^d	193,08 ±2,48 ^e	151,08 ±2,04 ^f	32,40± 0,59 ^g	270,54 ±3,15 ^h
<i>A. vulgaris</i>	6,48± 0,39 ^a	13,62± 0,42 ^b	–	25,50± 0,53 ^c	–	30,36± 0,64 ^d	34,02± 0,68 ^e	–	12,06± 0,44 ^b	–
<i>Betula pendula</i>	6,66± 0,31 ^a	31,56± 0,60 ^b	61,98± 1,04 ^c	24,84± 0,51 ^d	–	109,74 ±1,58 ^e	121,08 ±1,74 ^f	94,32± 1,32 ^g	17,04± 0,49 ^h	163,56 ±2,17 ⁱ
<i>C. bigno-nioides</i>	5,88± 0,36 ^a	25,68± 0,59 ^b	39,62± 0,66 ^c	29,30± 0,58 ^d	30,12± 0,65 ^{de}	78,84± 1,15 ^f	76,92± 1,18 ^{fg}	86,34± 1,24 ^h	12,54± 0,48 ⁱ	104,28 ±1,58 ^j
<i>E. angusti-fo- lia</i>	7,38± 0,36 ^a	35,58± 0,64 ^b	49,38± 0,86 ^c	37,44± 0,65 ^{bd}	37,26± 0,66 ^{bd}	122,16 ±1,74 ^e	116,22 ±1,64 ^{ef}	97,86± 1,44 ^g	14,22± 0,47 ^h	151,74 ±2,13 ⁱ
<i>F. lanceo- lata</i>	4,56± 0,36 ^a	16,5± 0,46 ^b	27,06± 0,55 ^c	–	21,84± 0,56 ^d	54,18± 0,96 ^e	45,84± 0,84 ^f	38,22± 0,63 ^g	11,58± 0,46 ^h	68,94± 1,05 ⁱ
<i>Juglans regia</i>	12,06± 0,44 ^a	61,86± 1,05 ^b	–	45,66± 0,88 ^c	92,16± 1,41 ^d	115,68 ±1,69 ^e	132,84 ±1,86 ^f	110,46 ±1,64 ^f	13,08± 0,49 ^{ag}	–
<i>Morus alba</i>	6,90± 0,34 ^a	12,96± 0,49 ^b	23,88± 0,58 ^c	13,68± 0,46 ^{bd}	16,92± 0,49 ^e	30,48± 0,68 ^f	34,50± 0,63 ^g	30,48± 0,65 ^f	10,44± 0,43 ^g	51,06± 0,93 ^h
<i>Populus alba</i>	12,96± 0,47 ^a	61,20± 1,09 ^b	74,22± 1,20 ^c	–	68,70± 1,02 ^d	–	164,16 ±2,10 ^e	122,46 ±1,72 ^f	–	–
<i>Populus nigra</i>	16,20± 0,49 ^a	49,44± 0,80 ^b	103,32 ±1,50 ^c	–	92,64± 1,44 ^d	190,02 ±2,47 ^e	182,58 ±2,35 ^{ef}	167,1± 2,14 ^g	–	230,88 ±2,86 ^h
<i>Populus piramidalis</i>	11,40± 0,44 ^a	–	56,64± 0,94 ^b	–	49,92± 0,84 ^c	161,04 ±2,14 ^d	–	123,84 ±1,79 ^e	14,70± 0,47 ^{af}	182,58 ±2,31 ^g
<i>Populus simonii</i>	10,80± 0,46 ^a	43,02± 0,84 ^b	81,72± 1,21 ^c	–	67,98± 1,09 ^d	–	145,20 ±1,92 ^e	111,96 ±1,64 ^f	28,86± 0,56 ^g	170,64 ±2,29 ^h
<i>R. pseudo- acacia</i>	5,22± 0,36 ^a	18,78± 0,46 ^b	30,30± 0,62 ^c	18,66± 0,45 ^{bd}	26,10± 0,54 ^e	48,90± 0,85 ^f	45,90± 0,82 ^{fg}	37,38± 0,65 ^h	13,02± 0,45 ⁱ	63,06± 1,02 ^j
<i>Salix alba</i>	6,90± 0,30 ^a	31,92± 0,62 ^b	29,22± 0,60 ^{bc}	24,84± 0,54 ^d	23,04± 0,59 ^{de}	54,30± 0,91 ^f	55,26± 0,95 ^{fg}	47,28± 0,82 ^h	15,54± 0,44 ⁱ	–
<i>Tilia cordata</i>	5,04± 0,32 ^a	16,20± 0,44 ^b	21,72± 0,53 ^c	13,92± 0,43 ^d	18,30± 0,54 ^{be}	42,48± 0,89 ^f	44,82± 0,81 ^{fg}	36,78± 0,65 ^h	10,68± 0,41 ⁱ	54,54± 0,98 ^j
<i>U. carpi- nifolia</i>	6,72± 0,39 ^a	12,96± 0,40 ^b	24,18± 0,55 ^c	18,42± 0,50 ^d	19,92± 0,51 ^{de}	52,26± 0,95 ^f	48,78± 0,84 ^{fg}	31,62± 0,61 ^h	16,2± 0,49 ^{di}	66,72± 1,01 ^j
<i>Ulmus laevis</i>	4,98± 0,34 ^a	16,32± 0,41 ^b	30,54± 0,62 ^c	17,94± 0,47 ^{bd}	25,68± 0,53 ^e	60,72± 1,01 ^f	54,24± 0,97 ^g	–	17,64± 0,49 ^{bd}	–

Примітки:

1) «–» цей вид дерев відсутній;

2) однакові латинські букви означають статистично незначущі розбіжності середніх у ряді на основі результатів використання тесту Тьюкі ($P < 0,05$);

3) промислові підприємства: 1 – Титаномангнієвий; 2 – Укрерафіт; 3 – Абразивний; 4 – Алюмінієвий; 5 – Феросплавний; 6 – Запоріжсталь; 7 – Вогнетрив; 8 – Трансформаторний; 9 – Коксохімічний.

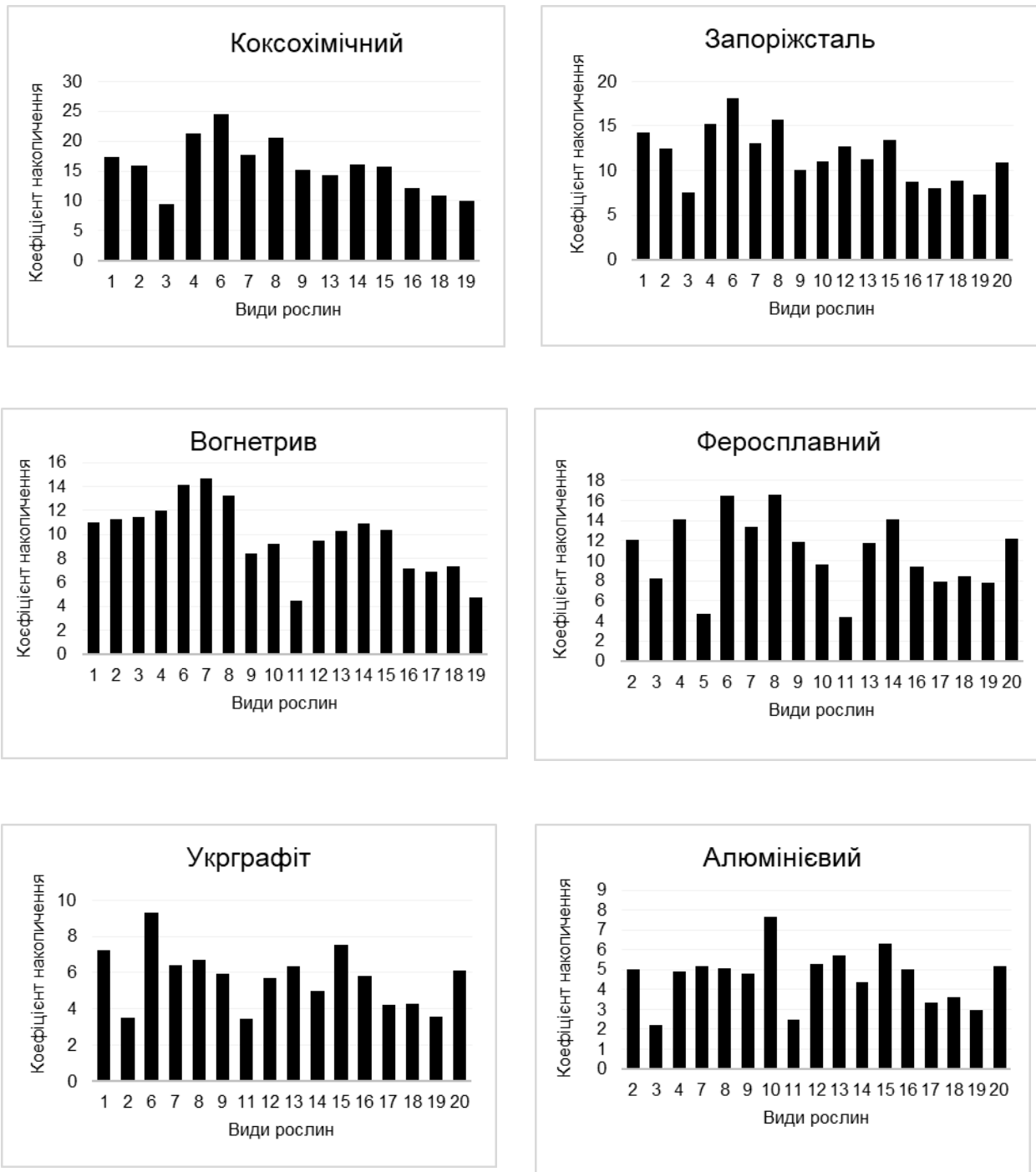
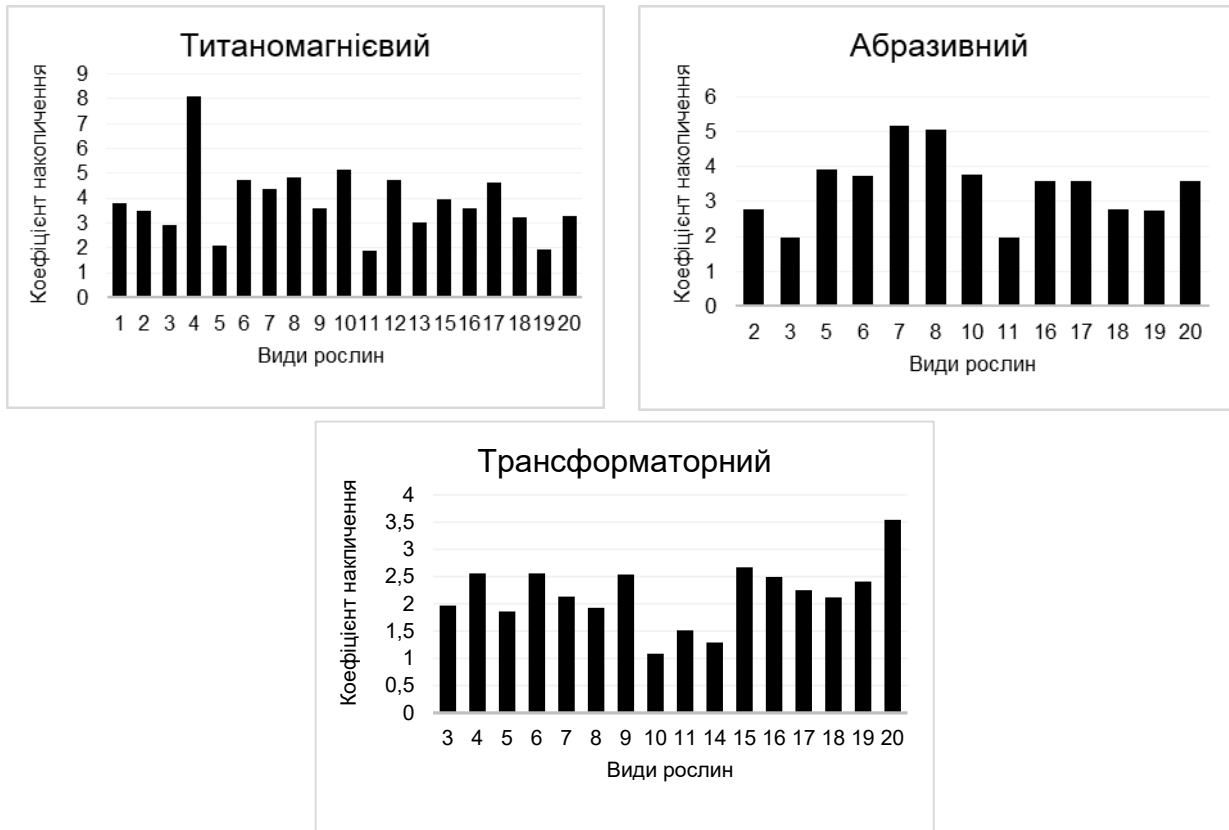


Рис. 2. Коефіцієнт відносного накопичення токсиканта (1 – *Acer negundo* L., 2 – *Acer platanoides* L., 3 – *Aesculus hippocastanum* L., 4 – *Ailanthus altissima* Mill., 5 – *Armeniaca vulgaris* Lam., 6 – *Betula pendula* Roth., 7 – *Catalpa bignonioides* Walter, 8 – *Elaeagnus angustifolia* L., 9 – *Fraxinus lanceolata* Borkh., 10 – *Juglans regia* L., 11 – *Morus alba* L., 12 – *Populus alba* L., 13 – *Populus nigra* L., 14 – *Populus pyramidalis* Borkh., 15 – *Populus simonii* Carr., 16 – *Robinia pseudoacacia* L., 17 – *Salix alba* L., 18 – *Tilia cordata* Mill., 19 – *Ulmus carpiniifolia* Rupp., 20 – *Ulmus laevis* Pall.)

Рис. 2, продовження



Відомо, що феноли здатні засвоюватись і коренями, і листками рослин. В останні вони надходять як через продиhi, так і через кутикулу й епідерміс (Тоуэрс, 1968; Угрехелидзе, 1976), завдяки добрій їх розчинності у ліпідах (Тарабрин и др., 1986). Феноли малорухливі і іммобілізуються переважно у тих органах деревних рослин, в які вони безпосередньо надходять (Тарабрин и др., 1986), тому перевищення їх кількості в листках в умовах забруднення відносно контролю в значній мірі відображує рівень поглинання їх з повітря. Проте величини їх акумуляції суттєво занижені, оскільки ці сполуки можуть піддаватися перетворенням в клітинах рослин. Так, відносно ряду екзогенних фенолів, відомо, що рослини можуть використовувати їх для синтезу β -глюкозидів (Glas, Bohm, 1971). Одним із шляхів детоксикації чужорідних монофенолів в рослинах може бути їх кон'югація з пептидами (Угрехелидзе, Цевелидзе, 1967). Є ряд відомостей, що рослини здатні здійснювати повне розщеплення ароматичної структури фенольних сполук до CO_2 (Угрехелидзе, Дурмишидзе, 1984). Клітинна стінка вважається одним з найбільш важливих місць детоксикації фенольних сполук в рослинах (Agostini et al., 2010).

Зіставлення вмісту токсиканту в листках різних видів деревних рослин санітарно-захисних зон промислових підприємств свідчить про видову специфіку його накопичення. Як видно з отриманих даних (табл.), максимальну кількість політанта, порівняно з іншими видами деревних рослин, накопичують листки видів: *Ailanthus altissima*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Populus pyramidalis*, *Populus simonii*, *Elaeagnus angustifolia*, найменшу – *Morus alba*, *Robinia pseudoacacia*, *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*, *Armeniaca vulgaris*, *Fraxinus lanceolata*.

Проміжне положення між цими двома групами займають: *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Aesculus hippocastanum*, *Catalpa bignonioides*, *Salix alba*, *Ulmus laevis*. Характерно, що в санітарно-захисних зонах різних підприємств в основному зберігається закономірність розташування видів у ряду накопичення політанта листками, хоча інколи спостерігається і відхилення від встановленої послідовності.

Кожен рід рослин, зростаючий на території санітарно-захисних зон, представлений одним видом, окрім *Populus* L. (чотири види), *Acer* L. та *Ulmus* L. (по два види). Всі представники роду *Populus* за вмістом токсиканту в листках віднесені до групи з максимальним накопиченням, роду *Acer* – до середньої. Два види, які входять до роду *Ulmus*, відрізняються за накопиченням. *Ulmus laevis* характеризується середнім рівнем акумуляції, *Ulmus carpinifolia* – найменшим. Більший абсолютний вміст у листках ряду дерев фенольних сполук в умовах забруднення ними повітря характеризує кращу їх атмосфероочисну функцію. До таких належать рослини, виділені в першу групу. Аналіз даних таблиці показує, що у вмісті водорозчинних фенолів у листках ряду однакових видів дерев захисних лісосмуг таких заводів, як Феросплавний та Запоріжсталь, різниця між показниками статистично не достовірна. Хоча у деяких однакових видів рослин кількість цих сполук у органах асиміляції вища біля заводу Запоріжсталь – *Acer platanoides*, *Catalpa bignonioides*, *Salix alba* та *Tilia cordata*. Близькі значення вмісту фенолів виявлені в листках однакових видів дерев, що зростають в санітарних зонах Абразивного та Титаномагнієвого комбінату, що пояснюється, можливо, відносно низькими концентраціями забруднювачів у повітрі.

За рівнем акумуляції в листках дерев, а, отже, за ступенем забруднення повітря фенолами, санітарно-захисної зони підприємства можна ранжувати наступним чином: Коксохім > Запоріжсталь ≥ Завод Феросплавів > Вогнетрив > Укрграфіт > Алюмінієвий > Титаномагнієвий > Абразивний > Трансформаторний завод.

Таким чином, найбільша кількість водорозчинних фенолів виявлена в листках рослин санітарно-захисних зон Коксохімічного заводу, Запоріжсталь, Феросплавний та Вогнетрив. Виробничий цикл перших трьох заводів характеризується найбільшою кількістю викидів токсиканта у повітрі (Фещенко, Каменова, 2016).

З точки зору фітоіндикації забруднення атмосферного повітря інгредієнтами промислових викидів становить інтерес такий показник, як коефіцієнт відносного накопичення – відношення кількості полютанта в листках рослин у районі забруднення до його вмісту в цих органах у контролі – «чистій зоні». Максимальне значення цього показника встановлено в листках *Betula pendula* санітарно-захисної зони Коксохімічного заводу (рис. 2). Ця рослина характеризується високим коефіцієнтом відносного накопичення і в захисних масивах інших підприємств. Найбільші його величини визначені в листках дослідних рослин зелених смуг заводів: Коксохімічний, Запоріжсталь, Феросплавний та Вогнетрив, а найменші – Абразивний та Трансформаторний. Порівнюючи дані, отримані для листків дерев санітарно-захисних зон різних підприємств, можна констатувати, що найвищі значення цього коефіцієнта встановлені у таких рослин, як *Betula pendula*, *Catalpa bignonioides*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ailanthus altissima*, *Populus simonii*, *Acer negundo*, *Ulmus laevis* та *Fraxinus lanceolata* (рис. 2). Саме ці рослини можна використовувати як інформативні фітоіндикатори забруднення повітря фенолами. Мінімальний коефіцієнт відносного накопичення полютанта виявлено у *Aesculus hippocastanum*, *Morus alba*, *Ulmus carpinifolia*, *Armeniaca vulgaris* та *Acer platanoides*.

Висновки

Вміст водорозчинних фенолів у листках рослин всіх досліджуваних насаджень санітарно-захисних зон промислових підприємств перевищує показники контрольного варіанту.

За рівнем акумуляції в листках дерев санітарно-захисної зони, а, отже, за ступенем забруднення повітря фенолами підприємства можна ранжувати наступним чином: Коксохім > Запоріжсталь ≥ Завод Феросплавів > Вогнетрив > Укрграфіт > Алюмінієвий > Титаномагнієвий комбінат > Абразивний > Трансформаторний завод.

Максимальну кількість полютанта, порівняно з іншими видами деревних рослин, накопичують листки наступних видів: *Ailanthus altissima*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Populus pyramidalis*, *Populus simonii*, *Elaeagnus angustifolia*, що дозволяє їх рекомендувати для насаджень санітарно-захисного призначення.

Найбільш високі значення коефіцієнту відносного накопичення встановлені у таких рослин, як *Betula pendula*, *Catalpa bignonioides*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ailanthus altissima*, *Populus simonii*, *Acer negundo*, *Ulmus laevis* та *Fraxinus lanceolata*. Саме ці рослини можна використовувати як інформативні фітоіндикатори забруднення повітря фенолами.

Отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій з добору асортименту деревних рослин для реконструкції зелених насаджень в санітарно-захисних зонах підприємств.

Список літератури / References

- Бахитова Л.М., Пашин Ю.В. (1982) Модификация мутагенной и канцерогенной активности химических загрязнителей. *Успехи современной генетики*, 10, 131–142. [Bakhitova L.M., Pashin Yu.V. (1982). Modification of mutagenic and carcinogenic activity of chemical pollutants. *Advances in Modern Genetics*, 10, 131–142.]
- Гетко Н.В. (1989). Растения в техногенной среде. Минск: Наука и техника. 208 с. [Getko N.V. (1989). *Plants in an industrial environment*. Minsk: Nauka i tekhnika. 208 p.]
- Долгова Л.Г., Козюкіна Ж.Т. (1972). До питання про біологічне очищення атмосфери в умовах коксохімічного підприємства. *Український ботанічний журнал*, 29(2), 172–175. [Dolgova L.G., Kozuykina Zh.T. (1972). Regarding the matter of biological purification of atmospheric air under the conditions of a coke enterprise. *Ukrainian Botanical Journal*, 29(2), 172–175.]
- Долина Л.Ф., Козачина В.А., Пристинський В.В. (2013). Моніторинг забруднення атмосферного повітря бенз(а)піреном та вуглеводнем. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, 6, 91–97. [Dolyna L.F., Kozachyna V.A., Prystyn'skyi V.V. Monitoring the atmospheric air pollution by benzo(a)pyrene and hydrocarbons. *Electromagnetic Compatibility and Railway Safety*, 6, 91–97. <https://doi.org/10.15802/ecsr2013/51294>]
- Илькун Г.М. (1978). Газоустойчивость растений. Київ: Наукова Думка. 142 с. [Il'kun G.M. (1978). *Gas resistance of plants*. Kyiv: Naukova Dumka. 142 p.]
- Кавеленова Л.М., Лищинская С.Н., Карандаева Л.Н. (2001). Особенности сезонной динамики водорастворимых фенольных соединений в листьях березы повислой в условиях урбосреды в лесостепи (на примере Самары). *Химия растительного сырья*, 3, 91–96. [Kavelenova L.M., Lishchinskaya S.N., Karandayeva L.N. (2001). Peculiarities in the seasonal dynamics of water-soluble phenolic compounds in the leaves of European white birch under the conditions of the urban environment in the forest steppe ecotone (using Samara region as an example). *Chemistry of plant raw materials*, 3, 91–96.]
- Капелюш Н.В., Бессонова В.П. (2007). Середовищеочищувальна роль *Platanus orientalis* у насадженнях санітарно-гігієнічного призначення. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*, 15(1), 59–66. <https://doi.org/10.15421/010711> [Kapelyush N.V., Bessonova V.P. (2007). The role of *Platanus orientalis* in sanitary and hygienic plantations as a universal biofilter. *Biosystems Diversity*, 15(1), 59–66. <https://doi.org/10.15421/010711>]
- Кипоть Н.С., Белопощенко В.П., Некомнящая А.С., Стеценко Е.А. (1976). О производстве фенольных продуктов на коксохимических заводах Украины. *Кокс и химия*, 5, 31–34. [Kipot' N.S., Vyeloposhchenko V.P., Nekomnyashchaya A.S., Stetsenko Ye.A. (1976). On the production of phenolic compounds at the Ukrainian coke plants. *Coke and Chemistry*, 5, 31–34.]
- Полторацька В.М. (2014). Системний аналіз визначення ступеня забруднення атмосфери викидами шкідливих речовин від автотранспорту та стаціонарних джерел коксохімічного виробництва ПАТ "Євраз ДМЗ ім. Петровського" на основі натурних спостережень та даних розрахунків на ЕОМ. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 3, 27–37. [Poltorats'ka V.M. (2014). System analysis of the assessment of the degree of atmospheric pollution by emissions of harmful substances from vehicles and stationary sources of industrial production of coke at the "Petrovsky Evraz DMZ" PJSC on the basis of field observations and data analysis performed with the help of a personal electronic computer. *Bulletin of the Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 3, 27–37.]
- Поліщук С.З., Полторацька В.М., Мінков Ю.І. (2012). Аналіз розподілу приземних концентрацій забруднюючих речовин на границі СЗЗ коксохімічного виробництва ПАТ "Євраз ДМЗ ім. Петровського" по даним натурних спостережень та розрахунків на ПЕОМ. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 38, 172–178. [Polishchuk S.Z., Poltorats'ka V.M., Minkov Yu.I. (2012). Analysis of the distribution of surface concentrations of pollutants at the boundary of a sanitary protection zone at the "Petrovsky Evraz DMZ" PJSC coke plant according to the field observations and calculations performed using a personal electronic computer. *Proceedings of the National Mining University*, 38, 172–178.]
- Сергейчик С.А. (1984). Древесные растения и промышленная среда. Минск: Наука и техника. 168 с. [Sergeyuchik S.A. (1984). *Woody plants and the industrial environment*. Minsk: Nauka i tekhnika. 168 p.]
- Тарабрин В.П., Кондратюк Е.Н., Башкатов В.Г. и др. (1986). Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. Киев: Наукова думка. 216 с. [Tarabrin V.P., Kondratyuk V.N., Bashkatov V.G. et al. (1986). *Phytotoxicity of organic and inorganic pollutants*. Kyiv: Naukova dumka, 1986. 216 p.]
- Тоуэрс Г.Х.Н. (1968). Метаболизм фенолов в высших растениях и микроорганизмах / Биохимия фенольных соединений. М.: Мир. С. 200–233. [Towers G.Kh.N. (1968). Metabolism of phenolic compounds in higher plants and microorganisms. *Biochemistry of phenolic compounds*. Moscow: Mir, pp. 200–233.]
- Угрехелидзе Д.Ш. (1976). Метаболизм экзогенных алканов и ароматических углеводородов в растениях. Тбилиси: Мецниереба. 224 с. [Ugrekheldize D.Sh. (1976). Metabolism of exogenous alkanes and aromatic hydrocarbons in plants. Tbilisi: Metzniyereba. 224 p.]

- Угрєхєлїдзє Д.Ш., Цєвєлїдзє Д.Ш. (1967). Усвоєнїє фєнолє высшїмї рєстєнїямї. *Сooбщ. АН ГрузССР*, 47(1), 43–49. [Ugrekhelidze D.Sh., Tsevelidze D.Sh. (1967). The absorption of phenolic compounds by higher plants. *Proceedings of the Academy of Sciences of GeorgSSR*, 47(1), 43–49.]
- Угрєхєлїдзє Д.Ш., Дурмїшїдзє С.В. (1984). Поступлєнїє и дєтєксїкєцїє оргєнїчєскїх ксєнобїотїкєв в рєстєнїях. Тбїлїсї: Мєцнїєрєбє. 230 с. [Ugrekhelidze D.Sh., Durmishidze S.V. (1984). *The intake and detoxification of organic xenobiotics in plants*. Tbilisi: Metzniyereba. 230 p.]
- Фєщєнкo О.Л., Камєнєвє Н.В. (2016). Оцїнкє вплїву дїєльнoстї мєтєлургїєнїх пїдпрїємств нє навколїшнє рєсєрєдєвїщє Укрєїнї. *Інвєстїцїї: прєктїкє тє дoсвїд*, 2, 28–32. [Feshchenko O.L., Kameneva N.V. (2016). Assessment of the impact of metallurgical enterprises on the environment of Ukraine. *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*, 2, 28–32.]
- Agostini E.I., Talano M.A., González P.S. et al. (2010). Phytoremediation of phenolic compounds: Recent advances and perspectives / In: I.A.Golubev (ed.) *Handbook of Phytoremediation*. Vol.1. Nova Science Publishers, pp. 1–50.
- Gami A.A., Shukor M.Y., Khalil K.A. et al. (2014). Phenol and its toxicity. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology*, 2(1), 11–24.
- Ghorani-Azam A., Riahi-Zanjani B., Balali-Mood M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of Research in Medical Sciences*, 21(65), 24–29. <https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646>
- Glass A.D.M., Bohm B.A. (1971). The uptake of simple phenols by barley roots. *Planta*, 100(2), 93–105. <https://doi.org/10.1007/BF00385211>
- Klimov P., Basilaia M. (2017). Estimation of atmospheric air pollution and health risk for Rostov-on-Don population. *Science Almanac of Black Sea region countries*, 10(2), 44–48. <https://doi.org/10.23947/2414-1143-2017-10-2-44-48>
- Lin J., Reddy M., Moorthi V., Qoma B.E. (2008). Bacterial removal of toxic phenols from an industrial effluent. *African Journal of Biotechnology*, 7(13), 2232–2238.
- Michałowicz J., Duda W. (2007). Phenols – sources and toxicity. *Polish J. of Environ. Stud.*, 16(3), 347–362.
- Sklyarenko A.V., Bessonova V.P. (2018). Accumulation of sulfur and glutathione in leaves of woody plants growing under the conditions of outdoor air pollution by sulfur dioxide. *Biosystems Diversity*, 26(4), 334–338. <https://doi.org/10.15421/011849>
- Swain T., Hillis W.E. (1959). The phenolic constituents of *Prunus domestica*. I. – The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10(1), 63–68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>
- Wei X., Lyu S., Yu Y. et al. (2017). Phylloremediation of air pollutants: exploiting the potential of plant leaves and leaf-associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 8(1318), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01318>

The content of water-soluble phenolic compounds in the leaves of woody plants growing in the area of sanitary protection zones of enterprises of the industrial region of Zaporizhzhya

A.V. Sklyarenko, V.P. Bessonova

The article presents the results of studying the accumulation of water-soluble phenolic compounds in the leaves of woody plants growing in the area of sanitary protection zones of a number of enterprises of Zaporizhzhya: Zaporizhzhya Titanium & Magnesium Combine, Zaporizhzhya Aluminium Plant, Zaporizhzhya Abrasive Plant, Zaporizhstal, Zaporizhcoke, Zaporizhzhya Ferroalloy Plant, Zaporizhvohnetryv, Ukrgrafit and Zaporizhtransformator. The concentration of phenolic compounds was found to be significantly higher under the technogenic conditions compared to the relatively "clean" area. Their highest concentration was found in the leaves of woody plants growing in the forest belt near the Zaporizhcoke plant. For the level of accumulation in the organs of assimilation of trees, and thereby for the degree of air pollution by the phenolic compounds, enterprises can be ranked as follows: Zaporizhcoke > Zaporizhstal ≥ Zaporizhzhya Ferroalloy Plant > Zaporizhvohnetryv > Ukrgrafit > Zaporizhzhya Aluminium Plant > Zaporizhzhya Titanium & Magnesium Combine > Zaporizhzhya Abrasive Plant > Zaporizhtransformator. Depending on the level of accumulation of phenolic compounds in the leaves, the plants have been divided into three groups. The largest amount of the pollutant, compared to the other species of woody plants, is being accumulated by the leaves of the following species: *Ailanthus altissima*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Populus pyramidalis*, *Populus simonii*, *Elaeagnus angustifolia*, and the least amount – by *Morus alba*, *Robinia pseudoacacia*, *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*, *Armeniaca vulgaris*, *Fraxinus lanceolata*. The following species occupy the intermediate position between the two groups: *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Aesculus hippocastanum*, *Catalpa bignonioides*, *Salix alba*, *Ulmus laevis*. The tree species that can be characterized by their capacity to accumulate the highest concentration of water-soluble phenolic compounds may be recommended for the purpose of purification of atmospheric air. The following plant species, which turned to be the most sensitive indicators of air pollution, have been listed in a descending order

according to the value of the coefficient of relative accumulation of phenolic compounds. Such species include *Betula pendula*, *Catalpa bignonioides*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ailanthus altissima*, *Populus simonii*, *Acer negundo*, *Ulmus laevis* and *Fraxinus lanceolata*.

Key words: sanitary protection zones, green plantations, air pollution, content of phenols, coefficient of pollutant accumulation, phytoindicators.

About the authors:

A.V. Sklyarenko – Dnipro State Agrarian and Economic University, Sergiy Yefremov Str., 25, Dnipro, Ukraine, 49600, s-k2015@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4954-5007>

V.P. Bessonova – Dnipro State Agrarian and Economic University, Sergiy Yefremov Str., 25, Dnipro, Ukraine, 49600, bessonova18@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4310-0971>

**Содержание водорастворимых фенолов в листьях древесных растений
санитарно-защитных зон заводов промышленной зоны Запорожья
А.В. Складенко, В.П. Бессонова**

Представлены результаты изучения накопления водорастворимых фенолов в листьях древесных растений санитарно-защитных насаждений промышленных предприятий г. Запорожье: Титаномагнийевый, Алюминиевый, Абразивный комбинаты, Запорожсталь, Коксохимический, Ферросплавный, Огнеупор, Украинский графит и Трансформаторный. Установлено значительно более высокое содержание фенольных соединений у растений, растущих в техногенных условиях по сравнению с контролем – «чистой зоной». Самые высокие концентрации фенолов обнаружены в листьях древесных растений лесополосы у завода Коксохим. По уровню аккумуляции в листьях деревьев санитарно-защитной зоны, а, значит, по степени загрязнения воздуха поллютантом, предприятия можно ранжировать следующим образом: Коксохим > Запорожсталь ≥ завод Ферросплавов > Огнеупор > Укрграфит > Алюминиевый > Титаномагнийевый комбинат > Абразивный > Трансформаторный завод. В зависимости от количества накапливающихся в листьях фенолов растения разделены на три группы. Максимальное количество поллютанта по сравнению с другими видами древесных растений накапливают листья деревьев следующих видов: *Ailanthus altissima*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Populus pyramidalis*, *Populus simonii*, *Elaeagnus angustifolia*, наименьшее – *Morus alba*, *Robinia pseudoacacia*, *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*, *Armeniaca vulgaris*, *Fraxinus lanceolata*. Промежуточное положение между этими двумя группами занимают: *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Aesculus hippocastanum*, *Catalpa bignonioides*, *Salix alba*, *Ulmus laevis*. Виды деревьев, которые характеризуются наибольшим накоплением водорастворимых фенолов, могут быть рекомендованы для оздоровления атмосферного воздуха. По величине коэффициента относительного накопления фенольных соединений выделены виды растений, которые являются наиболее информативными тест-объектами загрязнения атмосферного воздуха. К этим растениям отнесены *Betula pendula*, *Catalpa bignonioides*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ailanthus altissima*, *Populus simonii*, *Acer negundo*, *Ulmus laevis* и *Fraxinus lanceolata*.

Ключевые слова: защитные полосы, зеленые насаждения, загрязнение воздуха, содержание фенолов, коэффициент накопления поллютанта, фитоиндикаторы.

Об авторах:

А.В. Складенко – Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. Сергея Ефремова, 25, Днепр, Украина, 49600, s-k2015@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4954-5007>

В.П. Бессонова – Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. Сергея Ефремова, 25, Днепр, Украина, 49600, bessonova18@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4310-0971>

Представлено: І.О.Зайцева / Presented by: I.O.Zaytseva

Рецензент: О.О.Авксентьєва / Reviewer: O.O.Avksentieva

Подано до редакції / Received: 25.02.2020