

УДК 581.1:502.521

НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА ПЕРЕБІГ ВІЛЬНОРАДИКАЛЬНИХ РЕАКЦІЙ В АСИМІЛЯЦІЙНИХ ОРГАНАХ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ

В.М. ГРИШКО, О.М. ЗУБРОВСЬКА

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України
50089 Кривий Ріг, вул. Маршака, 50
e-mail: piskovajaolga@rambler.ru

У результаті визначення рівня й темпів акумуляції Zn, Ni, Pb і Cd у деревних рослин в умовах різного рівня забруднення їх види розділено на дві групи: з акумуляційним потенціалом, що перевищував фоновий рівень у 10 разів (*Populus bolleana*, *P. italica*, *Picea pungens*, *Sorbus aucuparia*), та ті, фоновий рівень для яких був перевищений від 5 до 10 разів (*Acer negundo*, *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula*, *Tilia cordata*). Показано, що на початку морфогенезу листків найвищий вміст первинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів був у *A. negundo* і *S. aucuparia*. Найістотніше кількість вторинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів (більш як у 2,5 раза) зростала в *B. pendula*, *Ae. hippocastanum*, *Picea pungens* і, як правило, узгоджувалась із темпами накопичення важких металів.

Ключові слова: деревні рослини, акумуляція, важкі метали, дієнові кон'югати, триєнові кон'югати, ТБК-активні продукти.

Останнім часом проблема охорони довкілля в промислових регіонах посідає особливе місце через значні масштаби і швидкість техногенних процесів, які призводять до концентрування в рослинах багатьох важких металів, а також забруднення навколишнього середовища іншими небезпечними хімічними сполуками [9]. У свою чергу, таке поліелементне накопичення токсичних речовин негативно впливає на рослинні організми і спричинює істотні порушення фізіолого-біохімічних процесів [11, 27, 28], що виявляється в активації процесів окиснювальної деструкції в рослинній клітині [3, 16, 21]. Очевидно, що оксидативний стрес як комплекс реакцій організмів на дію стресового чинника є універсальною відповіддю рослин і може об'єктивно характеризувати їх фізіологічний стан [15, 22, 26]. Виходячи з вищесказаного, ми вважали за потрібне дослідити особливості акумуляції цинку, свинцю, кадмію і нікелю в листках деревних рослин у зонах із різними рівнями забруднення промайданчика ЗАТ «Криворізький суриковий завод», а також динаміку процесів пероксидного окиснення ліпідів.

Методика

Об'єктами досліджень були *Populus bolleana* Lauche, *P. italica* (Du Roi) Moench, *Picea pungens* Engelm., *Acer negundo* L., *Tilia cordata* Mill., *Sorbus aucuparia* L., *Betula pendula* Roth. і *Aesculus hippocastanum* L. другої вікової

групи, що зростають на промайданчику ЗАТ «Криворізький суриковий завод» (у зонах сильного і слабого забруднення) та в дендрарії Криворізького ботанічного саду НАН України (умовний контроль). Для аналізу із середини крони південно-західної експозиції відбирали листки та хвою у фазу повного їх відособлення і на 80–85-ту доби фази завершення росту органів асиміляції.

Вміст важких металів у рослинному матеріалі визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115 (Україна) загальноприйнятими методами [19]. Показники внутрішньотканинного забруднення розраховували за Їльним [13]. Вміст дієнових і триєнових кон'югатів і ТБК-активних продуктів визначали на спектрофотометрі СФ-2000 (Росія) за Камішніковим [14]. Кількість білка в гомогенатах встановлювали за реакцією з бромфеноловим синім методом Грінберг [24]. Повторність кожного окремого варіанта досліду становила 10 рослин, аналітична повторність — чотириразова. Експериментальні дані оброблено статистично за загальноприйнятими методами параметричної статистики при 95 %-му рівні значущості за Доспеховим [12].

Результати та обговорення

Отримані дані дають підставу стверджувати, що в контрольних умовах у фазу повного відособлення листка цинк найбільшою мірою акумулювався у *A. negundo*, тоді як в асиміляційних органах *S. aucuparia*, *P. pungens* і *Ae. hippocastanum* його вміст був у 3,3–5,5 раза меншим (рис. 1). Слід зазначити, що для останнього характерна також найнижча концентрація нікелю в листках, тоді як у *P. bolleana*, *P. italica* і *B. pendula* його накопичувалось майже у 20 разів більше. Певну видоспецифічність акумуляції в листках деревних рослин встановлено також і для свинцю. Так, на початковому етапі морфогенезу органів асиміляції найбільшу його концентрацію (1,34–1,54 мкг/г сухої речовини) зафіксовано у *T. cordata*, *S. aucu-*

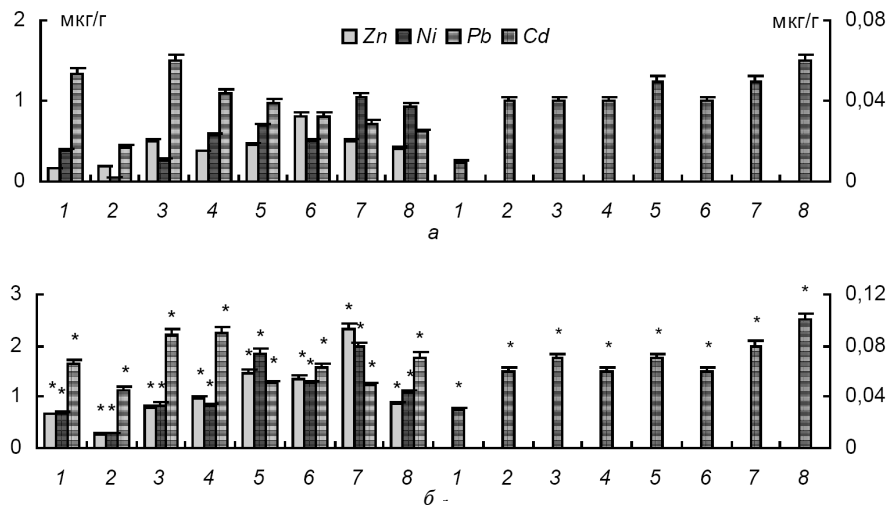


Рис. 1. Вміст важких металів (мкг/г сухої речовини) в асиміляційних органах контрольних деревних рослин:

a — фаза повного відособлення листків/хвої; *b* — 80–85-та доби фази завершення росту листків/хвої (права шкала побудована для кадмію); 1 — *S. aucuparia*; 2 — *Ae. hippocastanum*; 3 — *T. cordata*; 4 — *P. pungens*; 5 — *P. italica*; 6 — *A. negundo*; 7 — *P. bolleana*; 8 — *B. pendula*. *Статистично вірогідна різниця відносно вихідного рівня за $p < 0,05$

paria та *P. pungens*, натомість у листках *Ae. hippocastanum* цей метал накопичувався в 3,5 раза повільніше. Вміст кадмію в асиміляційних органах більшості видів коливався від 0,02 до 0,05 мкг/г сухої речовини.

Дещо відмінна картина акумуляції цинку спостерігалась на 80—85-ту доби фази завершення росту листків/хвої (див. рис. 1). Так, його максимальний вміст був у листках *P. bolleana* (2,31 мкг/г сухої речовини), мінімальний (0,27 мкг/г сухої речовини) — в *Ae. hippocastanum*. Стосовно інших важких металів встановлено характерну для попередньої фази морфогенезу листків/хвої тенденцію — найвища концентрація нікелю була притаманна *P. bolleana*, свинцю — *T. cordata* і *P. pungens*.

Із порівняння аналітичних даних, отриманих в умовах промислового майданчика, випливає, що найвища концентрація всіх досліджуваних металів у листках/хвої деревних рослин була у зоні сильного забруднення (рис. 2, а). Це пояснюється забрудненням атмосферного повітря поблизу підприємства суспендованими твердими часточками різної гідрофобності з вмістом сполук важких металів, які інтенсивно прилипають до асиміляційних органів [5, 20]. Загальний обсяг надходження в повітря важких металів у 2007—2011 рр. коливався від 7,0 до 14,6 тис. т/рік [9]. Крім того, на здатність листків поглинати важкі метали впливають їх морфоанатомічні особливості. Чим більше опушені листки й чим більше клейких компонентів вони продукують на поверхню, тим інтенсивніше листки затримують сполуки металів із забрудненої атмосфери [6, 23].

Ми встановили, що найвищі темпи акумуляції цинку в зоні сильного забруднення у фазу повного відособлення листків були характерні для *S. aucuparia*, в якій показник внутрішньотканинного забруднення листків (Z^p_d) перевищував 30. У *P. bolleana* і *P. italica* коефіцієнт біологічної акумуляції цинку коливався від 9,0 до 12,6, тоді як в інших видів — не перевищував 3,2. Аналогічний характер видоспецифічності темпів акумуляції спостерігався і в зоні слабого забруднення (див. рис. 2, б).

Доволі високі значення показника внутрішньотканинного забруднення листків/хвої ($Z^p_d > 20$) у фазу їх повного відособлення в обох зонах промислового впливу встановлено для кадмію та нікелю, причому першого елемента як за абсолютними, так і відносними показниками найбільше містилось у хвої *P. pungens*, тоді як другого за абсолютними показниками — у *P. bolleana*, *P. italica*, *Ae. hippocastanum*, за темпами акумуляції — у *A. hippocastanum*.

Накопичення в листках свинцю у фазу повного відособлення листків/хвої було мінімальним, що, ймовірно, пов'язано з антагоністичною дією іонів цинку [7]. Так, значення Z^p_d змінювались від 1,2 (*P. pungens*) до 3,3 (*P. bolleana*).

Узагальнену закономірність акумуляції важких металів у листках/хвої деревних рослин найоб'єктивніше відображає аналіз їх вмісту в період, коли ще активно не розвинулись процеси старіння і відтоку органічних сполук із листків до інших органів [2, 6, 9]. В нашому дослідженні цьому періоду відповідає 80—85-та доби фази завершення росту листків/хвої. Встановлено, що на цьому етапі в рослинах із пром. майданчика на обох забруднених ділянках найінтенсивніше акумулювався цинк (див. рис. 2, в). Високі показники його вмісту в зоні сильного забруднення були характерні для *P. bolleana* і *P. italica*, що узгоджується з попередньо отриманими даними Гришка і Данильчука [8] для тополь у зоні впливу забруднень гірничозбагачувальних фабрик, а також для *S. aucuparia*. Водночас ці види характеризувались великими значеннями

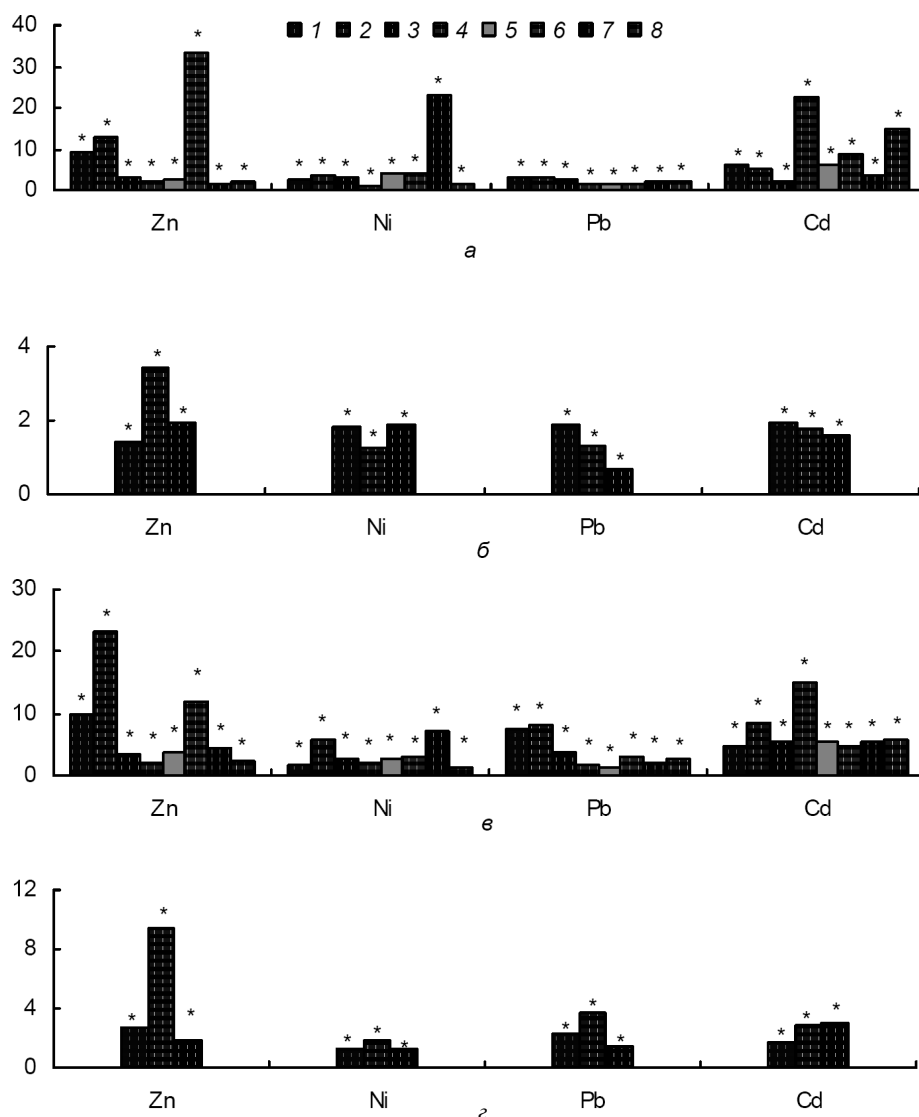


Рис. 2. Індекси внутрішньотканинного забруднення асиміляційних органів деревних рослин важкими металами у фазу повного відособлення листків/хвої (а, б) та на 80–85-ту доби фази завершення росту листків/хвої (в, г):

а, в – в зоні сильного забруднення; б, г – в зоні слабого забруднення; 1 – *P. bolleana*; 2 – *P. italica*; 3 – *A. negundo*; 4 – *P. pungens*; 5 – *T. cordata*; 6 – *S. aucuparia*; 7 – *Ae. hippocastanum*; 8 – *B. pendula*. *Статистично вірогідна різниця відносно контролю за $p < 0,05$

коефіцієнтів внутрішньотканинного забруднення (у 5,4–10 разів вищими, ніж інші види). Стосовно високого ступеня накопичення цинку в рослинах відомо, що він є вираженим елементом-біофілом, який бере участь у багатьох процесах метаболізму, тому його розчинні форми доступні для рослин, а поглинання цього елемента лінійно зростає з підвищенням його концентрації у ґрунті [7, 25].

Вміст нікелю на 80–85-ту доби завершення росту листків у *P. bolleana*, *P. italica* був у 3–4 рази вищий, ніж в інтактних рослин (див. рис. 2, в, г). Натомість мінімальний рівень його біологічної акумуляції був характерним для *P. pungens*. Накопичення свинцю наприкінці морфогенезу листків/хвої зростало майже втричі (див. рис. 2,

в, з), причому як за абсолютними, так і відносними показниками високі його концентрації були притаманні *P. bolleana*, *P. italica*, *A. negundo* (6,69—11,64 мкг/г сухої речовини). Кадмій акумулювався максимально інтенсивно в умовах зони сильного забруднення у хвої *P. pungens* (З^р у 1,8—3,2 раза був вищим, ніж для інших видів).

Слід зазначити, що листовим деревним рослинам була притаманна загальна закономірність максимального накопичення згаданих важких металів в умовах зони сильного забруднення порівняно із зоною слабого забруднення впродовж усього періоду досліджень. Так, в органах асиміляції рослин першої зони впродовж обох фаз морфогенезу листків кадмію накопичувалось в 1,4—3 рази більше, ніж у зоні слабого забруднення (див. рис. 2).

На підставі визначення рівня і темпів акумуляції Zn, Pb, Cd і Ni в асиміляційних органах деревних рослин в умовах різного рівня промислового забруднення види було поділено на дві групи. До першої, з найвищим акумуляційним потенціалом більшості важких металів, який у 10 разів перевищував фоновий рівень, увійшли *P. bolleana*, *P. italica*, *P. pungens*, *S. aucuparia*. До другої, із середнім рівнем акумуляції у 5—10 разів вищим за фоновий віднесено *A. negundo*, *Ae. hippocastanum*, *B. pendula*, *T. cordata*.

Рослини в промислових умовах змушені пристосовуватись до хронічної дії такого стресового чинника, як підвищений вміст токсичних речовин у повітрі, шляхом реалізації кількох адаптаційних стратегій. Існуючі на сьогодні дані дають підстави констатувати, що при забрудненні довкілля в рослин реалізуються механізми онтогенетичної (фізіологічної) адаптації, тобто внаслідок перебудови фізіологічних процесів на клітинному та організменому рівнях підвищується їх стійкість за відхилення від фізіологічного оптимуму напруженості певного чинника [10]. За даними наших досліджень, в умовах забруднення переважна більшість видів у штучних насадженнях реалізує потенціал засобів фізіологічної адаптації як організмів стрес-толерантів різного рівня за концепцією Раменського—Грайма (екологічних типів стратегій) [9, 17].

На фізіолого-біохімічному рівні провідним показником інтенсивності стресового впливу на живі організми за дії важких металів вважають продукти пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ), які, крім того, виконують роль (принаймні первинні продукти) каталізаторів процесу і забезпечують його самопришвидшення. Найімовірніше, їх певний рівень є сигналом запуску механізмів ослаблення токсичної дії іонів металів на рослини як на рівні надходження до клітини, так і їх компартменталізації у цитозолі [1, 2, 18].

За результатами досліджень вмісту первинних продуктів ПОЛ у листках контрольних рослин встановлено, що вже у фазу повного відособлення листків/хвої їх кількість була найбільшою у *P. bolleana*, *P. italica*, *Ae. hippocastanum* і сягала 1,53—1,64 та 0,98—1,54 одиниць абсорбції/г сирової речовини відповідно для дієнових і триєнових кон'югатів (табл. 1).

Оцінивши отримані результати, зазначимо, що за умов техногенного навантаження у фазу повного відособлення листків рослин у зоні сильного забруднення високий вміст дієнових і триєнових кон'югатів (у 1,2—1,7 раза вищий, ніж у контрольних рослин) виявлено в *A. negundo*, що належить до групи рослин із середнім рівнем акумуляції, а також у *S. aucuparia*, яка входить до складу групи з високим рівнем акумуляції, причому майже в усіх видів простежувався подібний характер розподілу

ТАБЛИЦЯ 1. Вміст первинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів в асиміляційних органах деревних рослин у фазу повного відособлення листків/хвої за стресового впливу важких металів (од. абсорбції/г сирої речовини)

Вид	Дієнові кон'югати		Триєнові кон'югати	
	$M \pm m$	% контролю	$M \pm m$	% контролю
Умовний контроль				
<i>Acer negundo</i>	1,40±0,03	—	0,90±0,02	—
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1,63±0,01	—	0,89±0,02	—
<i>Populus italica</i>	1,64±0,01	—	1,18±0,03	—
<i>Populus bolleana</i>	1,53±0,07	—	0,98±0,01	—
<i>Tilia cordata</i>	1,42±0,04	—	0,71±0,01	—
<i>Picea pungens</i>	1,37±0,07	—	0,89±0,01	—
<i>Sorbus aucuparia</i>	1,36±0,01	—	0,96±0,01	—
<i>Betula pendula</i>	1,50±0,03	—	1,37±0,01	—
Зона сильного забруднення				
<i>Acer negundo</i>	1,74±0,09*	123,8	1,50±0,04*	166,9
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1,71±0,01*	104,9	1,39±0,01*	156,1
<i>Populus italica</i>	1,94±0,01*	118,4	1,58±0,01	134,2
<i>Populus bolleana</i>	1,80±0,03*	117,4	1,44±0,04*	146,9
<i>Tilia cordata</i>	1,61±0,05*	113,5	1,17±0,02*	164,6
<i>Picea pungens</i>	1,51±0,06*	110,0	1,07±0,02	119,8
<i>Sorbus aucuparia</i>	1,76±0,02*	129,7	1,51±0,03*	157,4
<i>Betula pendula</i>	1,74±0,01*	116,0	1,50±0,01*	109,4
Зона слабого забруднення				
<i>Acer negundo</i>	1,59±0,03*	113,2	1,01±0,02*	112,6
<i>Aesculus hippocastanum</i>	—	—	—	—
<i>Populus italica</i>	1,73±0,02*	105,5	1,56±0,01*	131,7
<i>Populus bolleana</i>	1,70±0,01*	110,9	1,36±0,07*	138,9

Примітка. Тут і в табл. 2: *Статистично вірогідна різниця відносно контролю за $p < 0,05$; «—» — вид не росте.

первинних продуктів ПОЛ: дієнових кон'югатів містилося менше, ніж триєнових. Винятками були *B. pendula* і *P. pungens*, в яких зміни кількості кон'югованих дієнів і триєнів практично однакові.

Слід зазначити, що в рослин зоні слабого забруднення спостерігався аналогічний характер розподілу первинних продуктів ПОЛ. Де-що несподівано в цих умовах поведився *A. negundo*, в листках якого підвищення вмісту дієнових і триєнових кон'югатів виявилось майже однаковим. Це, можливо, пов'язано з видоспецифічним функціонуванням систем захисту рослин, у тому числі їх антиоксидантних ланок, а саме глутатіонзалежної антиоксидантної системи. Так, Безсонова та співавт. [4] встановили, що в разі надлишку важких металів у тканинах листків *A. saccharinum* вміст відновленої форми глутатіону був в 1,5 раза вищий, ніж у *Ae. hippocastanum* і *T. platyphyllos*.

У більшості контрольних видів рослин за подальшого розвитку листової пластинки кількісний склад первинних продуктів ПОЛ залишався

майже незмінним порівняно з вищеописаною фазою морфогенезу листка (табл. 2). Натомість у рослин зони сильного забруднення на 80–85-ту доби фази завершення росту листків/хвої вільнорадикальні процеси істотно інтенсифікувалися, про що свідчить зростання в 1,5–2,4 раза вмісту триєнових і дієнових кон'югатів. Так, крім *A. negundo* і *S. aucuparia* високу концентрацію первинних продуктів ПОЛ виявлено також у *Ae. hippocastanum* (вид із середнім рівнем акумуляції важких металів) і *P. bolleana*, *P. italica*, які належать до групи видів із високим акумуляційним потенціалом.

Високий вміст дієнових і триєнових кон'югатів у зоні слабого забруднення наприкінці морфогенезу листків встановлено у *P. bolleana* і *P. italica*, причому триєнових кон'югатів в асиміляційних органах містилося менше, ніж дієнових. Така закономірність була характерною й для всіх інших видів деревних рослин.

Збільшенню кількості дієнових і триєнових кон'югатів відповідало підвищення рівня вторинних продуктів ПОЛ — ТБК-активних сполук. Отримані результати (рис. 3) підтвердили, що в умовному контролі за

ТАБЛИЦЯ 2. Вміст первинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів в асиміляційних органах деревних рослин на 80–85-ту доби фази завершення росту листків/хвої за стресового впливу важких металів (од. абсорбції/г сирої речовини)

Вид	Дієнові кон'югати		Триєнові кон'югати	
	$M \pm m$	% контролю	$M \pm m$	% контролю
Умовний контроль				
<i>Acer negundo</i>	1,08±0,01	—	0,85±0,01	—
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1,44±0,03	—	1,10±0,02	—
<i>Populus italica</i>	1,10±0,01	—	1,10±0,03	—
<i>Populus bolleana</i>	1,10±0,01	—	1,11±0,01	—
<i>Tilia cordata</i>	1,51±0,02	—	1,26 ±0,03	—
<i>Picea pungens</i>	1,62±0,01	—	1,42±0,05	—
<i>Sorbus aucuparia</i>	1,34±0,04	—	0,92±0,01	—
<i>Betula pendula</i>	1,58±0,02	—	1,42±0,01	—
Зона сильного забруднення				
<i>Acer negundo</i>	2,00±0,01*	183,8	1,88±0,01*	220,2
<i>Aesculus hippocastanum</i>	2,91±0,03*	201,8	2,64±0,04*	239,1
<i>Populus italica</i>	2,22±0,02*	202,4	1,90±0,01*	172,1
<i>Populus bolleana</i>	2,08±0,01*	189,6	1,80±0,03*	161,6
<i>Tilia cordata</i>	2,07±0,02*	136,7	1,78±0,01*	141,8
<i>Picea pungens</i>	2,29±0,04*	141,6	2,01±0,02*	141,8
<i>Sorbus aucuparia</i>	2,04±0,03*	152,6	1,45±0,07*	157,2
<i>Betula pendula</i>	2,27±0,02*	143,6	2,09±0,01*	146,8
Зона слабого забруднення				
<i>Acer negundo</i>	1,30±0,01*	120,0	0,97±0,02	113,5
<i>Aesculus hippocastanum</i>	—	—	—	—
<i>Populus italica</i>	1,62±0,01*	147,3	1,41±0,02*	128,7
<i>Populus bolleana</i>	1,60±0,01*	145,1	1,41±0,03*	127,0

весь час досліджень вільнорадикальні процеси найінтенсивніше відбувалися в листках *B. pendula*, *S. aucuparia* і *T. cordata* (кількість ТБК-активних продуктів перевищувала показники в інших видів у 2 рази). Встановлений факт, на нашу думку, пояснюється значними темпами біологічної акумуляції нікелю й кадмію в листках цих видів. Однак необхідно враховувати також певну видоспецифічність перебігу процесів вільнорадикального окиснення.

Як видно з рис. 3, кількість ТБК-активних продуктів у листках деревних рослин за умов поліелементного забруднення проммайданчика ЗАТ «Криворізький суриковий завод» перевищувала їх вміст у тканинах контрольних рослин на обох етапах дослідження. Так, у фотосинтезуючих органах *P. bolleana* в зоні сильного забруднення у фазу повного відособлення листків концентрація вторинних продуктів ПОЛ зростала на 70 %, а в зоні слабого забруднення — на 50 % відносно контролю. Наприкінці морфогенезу листків цей показник збільшувався відповідно на 83 і 57 %.

Отримані результати підтвердили, що для видів з найвищими акумуляційними потенціалами, а саме *P. bolleana* і *P. italica*, характерним був доволі низький рівень вільнорадикальних процесів, який не перевищував цей показник у контрольних рослин більш як в 1,9 рази (див. рис. 3). На нашу думку, це можна пояснити підвищеною інтенсивністю функціонування антиоксидантних систем у тополь порівняно з іншими видами [4, 8].

Зауважимо, що у *S. aucuparia*, яка за рівнем акумуляційного потенціалу також належить до рослин першої групи, поряд зі значними показниками внутрішньотканинного забруднення листків спостерігалось зростання до 2 разів вмісту ТБК-активних сполук. Аналогічне підвищення вмісту вторинних продуктів ПОЛ характерне і для *T. cordata* — виду із середнім рівнем акумуляційного потенціалу. Доволі специфічно пово-

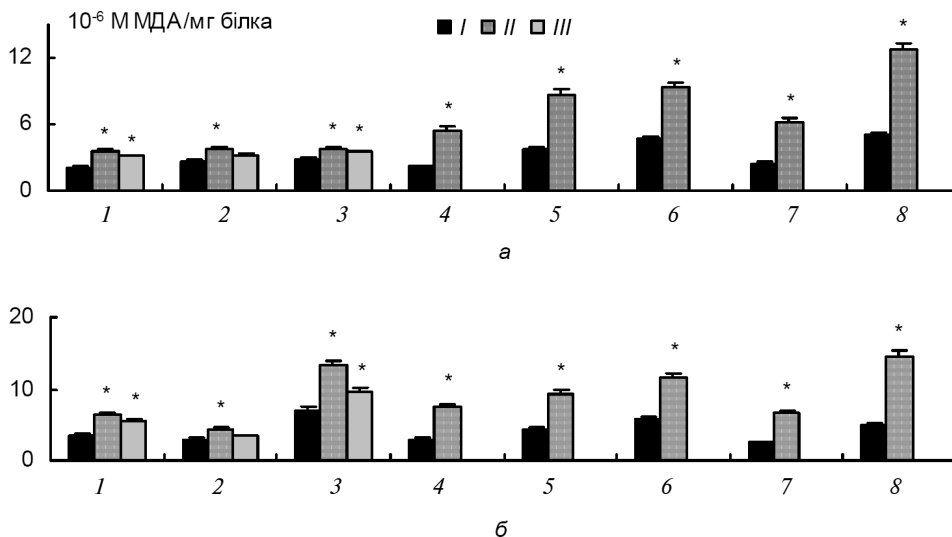


Рис. 3. Вміст ТБК-активних продуктів в асиміляційних органах деревних рослин (10^{-6} ММДА/мг білка) у фазу повного відособлення листків/хвої (а) та на 80—85-ту доби фази завершення росту листків/хвої (б):

I — умовний контроль; II — зона сильного забруднення; III — зона слабого забруднення; 1 — *P. bolleana*; 2 — *P. italica*; 3 — *A. negundo*; 4 — *P. pungens*; 5 — *T. cordata*; 6 — *S. aucuparia*; 7 — *A. hippocastanum*; 8 — *B. pendula*. *Статистично вірогідна різниця відносно контролю за $p < 0,05$

диться *A. negundo*, в якого за середнього коефіцієнта біологічної акумуляції у фазу повного відособлення листків/хвої процесу ПОЛ активувались на 40 %, а у фазу завершення росту листків — майже вдвічі. Найістотніше зростання вмісту ТБК-активних сполук (більш як у 2,5 раза) у різних зонах промислового забруднення було властиве *B. pendula*, *Ae. hippocastanum* і *P. pungens*.

Отже, за рівнем і темпами накопичення Zn, Pb, Cd і Ni в зоні дії промислового підприємства деревні рослини можна поділити на дві групи: з високим акумуляційним потенціалом більшості важких металів, який перевищує фоновий рівень у 10 разів (*P. bolleana*, *P. italica*, *P. pungens*, *S. aucuparia*), та із середнім рівнем акумуляції, що перевищує фоновий рівень від 5 до 10 разів (*A. negundo*, *Ae. hippocastanum*, *B. pendula*, *T. cordata*). Крім того, під впливом аеротехногенних викидів у листках відбуваються видоспецифічні зміни на фізіолого-біохімічному рівні. Вже на початкових етапах морфогенезу листків за дії промислового забруднення активувалися вільнорадикальні процеси, на що вказувало зростання вмісту первинних продуктів ПОЛ. В умовах сильного забруднення найвищий їх вміст виявлено в *A. negundo* та *S. aucuparia*. Характерною особливістю було те, що в більшості видів зростання вмісту дієнових кон'югатів було меншим, ніж триєнових. З'ясовано також, що навіть незначний вміст забруднювачів в асиміляційних органах деревних рослин призводив до інтенсифікації ПОЛ, про що свідчило зростання концентрації ТБК-активних продуктів більш як у 2,5 раза. Зазначене швидше за все зумовлене видоспецифічністю функціонування антиоксидантних систем захисту у видів із різним рівнем стрес-толерантності.

Робота виконана за проектом «Транслокація важких металів і фтору в системі ґрунт—рослина та підвищення стійкості рослин за дії абіотичних факторів» (2010—2014) цільової комплексної міждисциплінарної програми наукових досліджень НАН України з проблем сталого розвитку, раціонального природокористування та збереження навколишнього середовища.

1. Артюшенко Т.А. Участь аскорбінової кислоти і ферментів її метаболізму у фізіологічній адаптації гороху та кукурудзи до сумісної дії сполук нікелю і кадмію: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — К., 2012. — 21 с.
2. Барабой В.А. Механизмы стресса и перекисное окисление липидов // Успехи соврем. биологии. — 1991. — 111. — С. 923—931.
3. Бацманова Л.М., Грудіна Н.С., Стороженко В.О., Таран Н.Ю. Адаптивні реакції рослин озимої пшениці різних екотипів за дії перексиду водню // Физиология и биохимия культ. растений. — 2010. — 42, № 2. — С. 163—168.
4. Безсонова В.П., Козюкіна Ж.Т., Лиженко І.І. Вплив техногенних умов на вміст аскорбінової кислоти та глутатіону в листі різних рослин // Укр. ботан. журн. — 1989. — 46, № 3. — С. 83—85.
5. Бессонова В.П., Зайцева І.А. Вміст важких металів у листі дерев та чагарників в умовах техногенного забруднення різного походження // Питання біоіндикації та екології. — Запоріжжя, 2008. — 13, № 2. — С. 62—77.
6. Гиниятуллин Р.Х. Биоконсервация металлов в надземных органах тополя бальзамического в условиях промышленного загрязнения / Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лес. вестн. — 2007. — № 1. — С. 53—56.
7. Гладков Е.А. Влияние комплексного взаимодействия тяжелых металлов на растения мегаполисов // Экология. — 2007. — № 1. — С. 71—74.
8. Гришко В.Н., Данильчук А.В. Содержание тяжелых металлов и продуктов перекисного окисления липидов у тополей в условиях загрязнения // Интродукция растений. — 2004. — № 2. — С. 54—59.
9. Гришко В.М., Сициков Д.В., Піскова О.М. та ін. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна небезпека. — Донецьк: Донбас, 2012. — 303 с.

10. Гродзинский Д.М. Адаптивная стратегия физиологических процессов растений. — Киев: Наук. думка, 2012. — 302 с.
11. Гуральчук Ж.З. Фітотоксичність важких металів та стійкість рослин до їх дії. — К.: Логос, 2006. — 208 с.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — М.: Агропромиздат, 1985. — 351 с.
13. Ильин В.Б., Степанова М.Д. Относительные показатели загрязнения в системе почва—растение // Почвоведение. — 1979. — № 11. — С. 61—67.
14. Камышников В.С. Справочник по клинико-биохимической лабораторной диагностике: В 2 т. — Минск: Беларусь, 2000. — Т. 2. — 207 с.
15. Клеточные механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям экологических факторов в естественных условиях / Под ред. Е.Л. Кордюм. — К.: Наук. думка, 2003. — 275 с.
16. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В. Активные формы кислорода при адаптации растений к стрессовым температурам // Физиология и биохимия культ. растений. — 2009. — **41**, № 2. — С. 95—108.
17. Косаківська І.В. Екологічний напрям у фізіології рослин: досягнення та перспективи // Там само. — 2007. — **39**, № 4. — С. 279—290.
18. Кошкин Е.И. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. — М.: Дрофа, 2010. — 638 с.
19. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. — М.: Б.и., 1989. — 62 с.
20. Сергейчик С.А. Устойчивость древесных растений в техногенной среде. — Минск: Наука і техника, 1994. — 278 с.
21. Таран Н.Ю., Оканенко О.А., Бацманова Л.М. Вторичный оксидный стресс как элемент загальной адаптивной відповіді рослин на дію несприятливих факторів довкілля // Физиология и биохимия культ. растений. — 2004. — **36**, № 1. — С. 3—14.
22. Gill S.S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants // Plant Physiol. Biochem. — 2010. — **48**. — P. 909—930.
23. Godzik B. Heavy metals content in plants from zinc dumps and reference areas // Polish. Bot. Stu. — 1993. — **5**. — P. 113—132.
24. Greenberg Ch.S., Gaddock Rh.R. Rapid single step membrane protease assay // Clin. Chem. — 1982. — **28**, N 7. — P. 1726—1728.
25. Guillermo S.-M.E., Cogliatti D.H. The regulation of zinc uptake in wheat plants // Plant Sci. — 1998. — **137**, N 6. — P. 1—12.
26. Kosyk O., Okanenco A., Batsmanova L., Taran N.Yu. Wheat glycolipid changes while lead ion action // Book of Publications XXXVI Annual Meeting European Society for New Methods in Agricultural Research (ESNA). — Jasi, Romania, 2006. — P. 533—540.
27. Sima Gh., Fatemeh Z. Histological and ultrastructure changes in *Medicago sativa* in response to lead stress // J. Pharmacognosy and Phytochemistry. — 2013. — **2**, N 2. — P. 20—29.
28. Soares A.M., Gomes M.P., Marques T. et al. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens* // Sci. Agr. — 2011. — **68**. — P. 566—573.

Отримано 11.08.2014

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ПРОТЕКАНИЕ СВОБОДНОРАДИКАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ В АССИМИЛЯЦИОННЫХ ОРГАНАХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В.Н. Гришко, О.Н. Зубровская

Криворожский ботанический сад Национальной академии наук Украины

В результате определения уровня и темпов аккумуляции Zn, Ni, Pb и Cd у древесных растений в условиях разного уровня загрязнения их виды разделены на две группы: с аккумуляционным потенциалом, превышающим фоновый уровень в 10 раз (*Populus bolleana*, *Populus italica*, *Picea pungens*, *Sorbus aucuparia*), и те, фоновый уровень для которых был превышен от 5 до 10 раз (*Acer negundo*, *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula*, *Tilia cordata*). Показано, что в начале морфогенеза листьев наивысшее содержание первичных продуктов перексидного окисления липидов было у *A. negundo* и *S. aucuparia*. Наиболее существенно количество вторичных продуктов перексидного окисления липидов (более чем в 2,5 раза)

возрастало у *Betula pendula*, *Aesculus hippocastanum*, *Picea pungens* и, как правило, согласовывалось с темпами накопления тяжелых металлов.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS AND FREE RADICAL REACTIONS IN THE ASSIMILATION ORGANS OF WOODY PLANTS IN CONTAMINATION CONDITIONS

V.M. Gryshko, O.M. Zubrovs'ka

Kryvyi Rig Botanic Garden, National Academy of Sciences of Ukraine
50 Marshak St., Kryvyi Rig, 50089, Ukraine

Determination of the level and tempo of Zn, Ni, Pb and Cd accumulation in woody plants under different contamination levels allowed to divide species into two groups: ones with accumulation potential exceeding in 10 times the background level (*Populus bolleana*, *Populus italica*, *Picea pungens* and *Sorbus aucuparia*), and ones for which the excess of the background level was from 5 to 10 times (*Acer negundo*, *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula* and *Tilia cordata*). It is shown that in the beginning of leaf morphogenesis the high content of lipid peroxidation primary products was inherent for *Acer negundo* and *Sorbus aucuparia*. It was established significant increase in the secondary lipid peroxidation products amount (more than in 2.5 times) in *Betula pendula*, *Aesculus hippocastanum* and *Picea pungens*, which tend to match with the heavy metals accumulation tempo.

Key words: woody plants, accumulation, heavy metals, diene conjugates, triene conjugates, TBA-active products.