

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ПРОДУКТОВ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ У ТОПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Исследована зависимость между накоплением тяжелых металлов и содержанием диеновых конъюгатов, диенкетонов и ТБК-активных продуктов в ассимиляционном аппарате Populus deltoides Marsh., P. italica Moench, P. simonii Carr., P. candicans Ait., произрастающих в условиях с разной степенью загрязнения. Показана видоспецифичность накопления железа, марганца, цинка, никеля, меди, свинца и кадмия интродуцентами. Установлено статистически достоверное увеличение содержания продуктов перекисного окисления липидов в листьях тополей, произрастающих в условиях загрязнения.

Исследование видоспецифичных адаптивных реакций растений в различных условиях произрастания – одна из главных задач интродукции. В условиях крупных промышленных центров Украины с развитой горно-металлургической промышленностью, в частности в Кривом Роге, доминирующим техногенным фактором является повышенное содержание в грунте тяжелых металлов. Наибольшее воздействие они оказывают на виды тополей, широко используемые в озеленении промышленных площадок и санитарно-защитных зон рудообогатительных фабрик (РОФ). Реакция растений на повышенное содержание в грунте тяжелых металлов проявляется на уровне организма, органа и клетки. Поступление в клетку токсических веществ приводит к изменению физико-химических свойств протоплазмы, нарушению функционирования белковых структур и мембран органелл. Развиваются стрессовые реакции, сопровождаемые усилением процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) [3]. В зави-

симости от интенсивности и длительности воздействия эти нарушения могут затрагивать и другие жизненно важные процессы, в частности фотосинтез, дыхание, и проявляться визуально в виде хлорозов и некрозов [6, 12]. Имеются данные об интенсивности процессов ПОЛ у растений при действии газообразных органических и неорганических соединений и ртути, но остается неизученным комплексное влияние тяжелых металлов в промышленных выбросах [4, 11, 12]. Актуальной является проблема оценки способности тополей накапливать тяжелые металлы в условиях загрязнения среды горно-перерабатывающими предприятиями. Поэтому для выяснения механизмов функционирования систем адаптации у интродуцентов на промышленных площадках горно-перерабатывающих предприятий были изучены процессы аккумуляции тяжелых металлов и интенсивность ответных реакций ПОЛ.

В качестве объектов исследований использовались листья растений Populus deltoides Marsh., P. italica Moench, P. simonii Carr. и P. candicans Ait., произрастающих на территории промплощадки рудообогат-

тительной фабрики Северного горно-обогатительного комбината (СевГОК) и дендрария Криворожского ботанического сада НАН Украины (условный контроль). Содержание тяжелых металлов (железа, марганца, цинка, никеля, меди, свинца и кадмия) определялось с помощью атомно-адсорбционного спектрофотометра С-115 (Украина). Минерализация проб проводилась методом сухого озоления, экстракция тяжелых металлов осуществлялась с использованием разведенной (1:1) азотной кислоты [13]. Количество продуктов ПОЛ определяли в 20%-х гомогенатах листьев, приготовленных на 0,1 М калий-фосфатного буфера, содержащего 0,25 М сахарозы; содержание диеновых конъюгатов и диенкетонов – по методу И.Д. Стальной в нашей модификации [7], содержание ТБК-активных продуктов – по методу Э.Н. Корабейниковой с использованием тиобарбитуровой кислоты в модификации В.Н. Гришко и Д.В. Сыщикова [4].

Анализ полученных результатов показал, что в ассимиляционном аппарате тополей в условиях загрязнения уровень накопления тяжелых металлов повышен по сравнению с контролем (табл. 1). В листьях *P. italica* меди накапливается в среднем в 2,5, а железа – в 1,5 раза больше, чем у остальных видов. Полученные данные хорошо согласуются с увеличением на 25–30% содержания подвижных форм этих элементов в почве промышленной площадки РОФ [5]. При анализе накопления металлов растениями следует учитывать тот факт, что в отношении меди, вероятнее всего, преобладает пассивная адсорбция из почвенного раствора в клетки корня, тогда как железо поглощается растениями метаболическим путем [8, 10].

Как показали наши исследования, в условиях промышленной площадки наибольшее количество цинка накапливается в листьях *P. italica*, тогда как у *P. simonii*, *P. deltoides* и *P. candicans* его содержание меньше в 1,2, 1,7 и 4,8 раза соответственно (табл. 1). Имеющиеся литературные данные

свидетельствуют, что растворимые формы цинка доступны для растений и поглощение этого элемента линейно возрастает с повышением его концентрации в растворе или почве. Вопрос о том, является ли потребление цинка активным или пассивным процессом, остается дискуссионным. Однако полученные большинством исследователей результаты показывают, что потребление цинка определяется метаболизмом растений, хотя некоторую роль в этом может играть и неметаболический процесс [10, 15, 16].

Поступая в клетки растений в значительных количествах, тяжелые металлы оказывают ингибирующее действие на протекание многих физиолого-биохимических процессов. Общеизвестно, что токсичность тяжелых металлов возрастает по мере увеличения относительной атомной массы. Согласно классификации Ю.В. Алексеева цинк, медь, железо, марганец и кадмий относятся к группе умеренно токсичных элементов, тогда как никель и свинец являются очень фитотоксичными [1]. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что как в условиях промышленной площадки, так и дендрария ботанического сада, в ассимиляционном аппарате тополей содержание умеренно токсичных элементов значительно выше, чем очень токсичных. Так, у *P. simonii* концентрация железа, марганца и цинка в 10–200 раз выше, чем никеля и свинца. Таким образом, подтверждается постулат о наличии защитных барьеров на пути проникновения в клетку наиболее токсичных элементов [6, 8].

Для оценки видовой специфичности накопления тяжелых металлов тополями был использован коэффициент накопления элемента, представляющий собой отношение содержания металла в условиях загрязнения к его количеству в контроле [14]. Анализ полученных данных (табл. 2) показывает, что в условиях промышленной площадки РОФ тополя являются накопителями тяжелых металлов (кроме марганца). Для

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в листьях видов *Populus*, произрастающих в разных экологических условиях, мг/кг сух. в-ва

| Место произрастания | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | Ni | | Pb | | Cd | |
|---------------------|-------------------|------|---------------|------|---------------|------|-----------------|------|---------------|------|---------------|------|--------------|------|
| | M ± m | V, % | M ± m | V, % | M ± m | V, % | M ± m | V, % | M ± m | V, % | M ± m | V, % | M ± m | V, % |
| Ден-драрий | 205,64 ± 8,47 | 7,1 | 90,64 ± 2,21 | 4,2 | 14,80 ± 1,26 | 14,7 | 56,60 ± 1,40 | 4,3 | 5,64 ± 0,31 | 9,4 | 4,12 ± 0,10 | 4,1 | 2,15 ± 0,11 | 8,9 |
| РОФ | 2292,20 ± 117,42* | 8,9 | 93,27 ± 5,64 | 10,5 | 40,55 ± 1,99* | 8,5 | 215,35 ± 10,15* | 8,2 | 8,41 ± 0,21* | 4,3 | 9,93 ± 0,43* | 7,5 | 4,94 ± 0,06* | 2,0 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Ден-драрий | 362,78 ± 27,48 | 13,1 | 79,76 ± 4,27 | 9,3 | 5,09 ± 0,32 | 10,7 | 49,60 ± 2,79 | 9,7 | 1,35 ± 0,06 | 7,9 | 6,24 ± 0,41 | 11,3 | 4,66 ± 0,17 | 6,4 |
| РОФ | 1604,73 ± 79,57* | 8,6 | 40,64 ± 0,17* | 0,7 | 15,55 ± 0,51* | 5,7 | 125,48 ± 5,41* | 7,5 | 2,33 ± 0,12* | 9,2 | 16,33 ± 0,26* | 2,7 | 5,80 ± 0,26* | 7,9 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Ден-драрий | 1058,78 ± 33,52 | 5,5 | 56,52 ± 0,61 | 1,9 | 8,60 ± 0,17 | 3,5 | 30,02 ± 2,29 | 13,2 | 14,43 ± 0,08 | 1,0 | 3,88 ± 0,14 | 6,4 | 3,28 ± 0,21 | 11,3 |
| РОФ | 1500,84 ± 48,10* | 5,6 | 21,79 ± 1,14* | 9,1 | 17,52 ± 0,11* | 1,1 | 45,02 ± 0,71* | 2,7 | 16,25 ± 0,09* | 1,0 | 5,29 ± 0,23* | 7,6 | 8,08 ± 0,14* | 3,0 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Ден-драрий | 347,88 ± 16,65 | 8,3 | 79,31 ± 2,49 | 5,4 | 15,49 ± 1,23 | 13,8 | 171,20 ± 1,23 | 1,2 | 7,79 ± 0,25 | 5,5 | 5,41 ± 0,26 | 8,3 | 5,58 ± 0,38 | 11,8 |
| РОФ | 1422,30 ± 3,37* | 0,4 | 34,18 ± 2,52* | 12,8 | 16,21 ± 0,79 | 8,4 | 181,40 ± 4,36 | 4,2 | 11,30 ± 1,08* | 16,6 | 7,12 ± 0,37* | 9,0 | 9,42 ± 0,77* | 14,2 |

* Различия достоверны относительно контроля, $P < 0,05$.

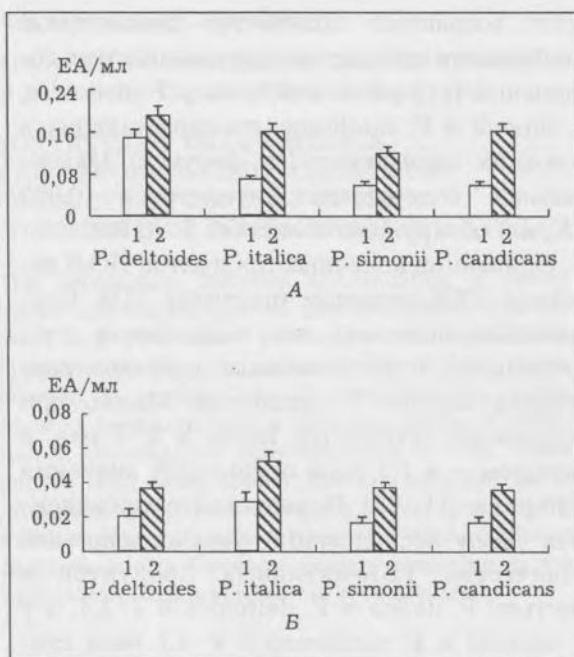
последнего коэффициент накопления незначительно превышал 1 (*P. italica*) или был меньше этой величины (*P. simonii*, *P. deltoides* и *P. candicans*). Среди изученных видов тополей наибольшее содержание меди, никеля и свинца наблюдалось у *P. deltoides*, железа и цинка – у *P. italica*, а кадмия – у *P. candicans*. Наименьшие значения коэффициента накопления железа и никеля были характерны для *P. candicans*, меди и цинка – для *P. simonii*, тогда как по накоплению свинца эти виды отличались незначительно. Таким образом, можно констатиро-

Таблица 2. Коэффициенты накопления тяжелых металлов тополями в условиях загрязнения

| Элемент | <i>P. deltoides</i> | <i>P. italica</i> | <i>P. simonii</i> | <i>P. candicans</i> |
|---------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Fe | 4,42 | 11,15 | 4,09 | 1,42 |
| Mn | 0,51 | 1,03 | 0,43 | 0,39 |
| Cu | 3,06 | 2,74 | 1,05 | 2,04 |
| Zn | 2,53 | 3,80 | 1,06 | 1,50 |
| Ni | 1,73 | 1,49 | 1,45 | 1,13 |
| Pb | 2,62 | 2,41 | 1,32 | 1,36 |
| Cd | 1,24 | 2,30 | 1,69 | 2,46 |

Таблица 3. Содержание ТБК-активных продуктов в листьях тополей в различных экологических условиях, мкМ/мг белка

| Место произрастания | M ± m | V, % | % к контролю | t _{st} |
|---------------------|--------------|------|--------------|-----------------|
| <i>P. deltoides</i> | | | | |
| Дендрарий | 0,10 ± 0,003 | 4,68 | – | – |
| РОФ | 0,28 ± 0,016 | 9,87 | 272,8 | 0,96 |
| <i>P. italica</i> | | | | |
| Дендрарий | 0,25 ± 0,012 | 8,43 | – | – |
| РОФ | 0,53 ± 0,002 | 0,65 | 214,3 | 3,15 |
| <i>P. simonii</i> | | | | |
| Дендрарий | 0,07 ± 0,001 | 1,47 | – | – |
| РОФ | 0,30 ± 0,003 | 1,88 | 438,1 | 9,97 |
| <i>P. candicans</i> | | | | |
| Дендрарий | 0,13 ± 0,003 | 4,39 | – | – |
| РОФ | 0,61 ± 0,009 | 2,57 | 458,3 | 9,44 |



Количество диеновых конъюгатов (А) и диенкетонов (Б) в листьях тополей в условиях загрязнения: 1 – дендрарий; 2 – промышленная площадка (различия статистически достоверны, $P < 0,05$)

вать, что наибольшими накопителями изученных тяжелых металлов являются *P. deltoides* и *P. italica*.

Поступление значительных количеств тяжелых металлов приводит к интенсификации процессов ПОЛ в клетках ассимиляционного аппарата интродуцентов. Так, содержание диеновых конъюгатов, являющихся одними из первичных продуктов ПОЛ, в листьях *P. italica* и *P. simonii*, растущих на промышленной площадке РОФ, возрастает в среднем в 2,2 раза, тогда как у *P. deltoides* – на 20% по сравнению с растениями дендрария (см. рисунок). В условиях загрязнения быстрее всего (в 2,6 раза) повышается количество первичных продуктов перекисного окисления липидов в листьях *P. candicans*. В то же время максимальное содержание этих продуктов (0,19 ЕА/мл гомогената) характерно для *P. deltoides*. Наряду с увеличением содержания диеновых конъю-

гатов возрастает количество диенкетонов. Наибольшее повышение содержания этих соединений (в 2 раза) отмечено у *P. deltoides*, *P. simonii* и *P. candicans*, произрастающих в условиях загрязнения (см. рисунок). Максимальное содержание диенкетонов (0,053 ЕА/мл) обнаружено в листьях *P. italica*.

Одними из конечных продуктов ПОЛ являются ТБК-активные продукты. И.И. Коршиковым показано, что содержание этих соединений у укорененных черенков различных клонов *P. canadensis* Marsh. при фумигации сернистым газом в 5–7 раз, а фенолом – в 1,3 раза превышает значения контроля [11, 12]. В результате проведенных нами исследований установлено, что количество ТБК-активных продуктов в листьях *P. italica* и *P. deltoides* в 2–2,8, а у *P. simonii* и *P. candicans* в 4–4,7 раза статистически достоверно выше в условиях промышленной площадки по сравнению с контролем (табл. 3). Максимальное содержание ТБК-активных продуктов (по абсолютным значениям) обнаружено в листьях *P. candicans* и составляет 0,61 мкМ/мг белка. Эти данные хорошо согласуются с результатами комплексной оценки устойчивости тополей к различным газообразным соединениям, осуществленной В.Г. Антиповым и Г.М. Илькуном, согласно которым *P. deltoides* и *P. italica* характеризуются наибольшей устойчивостью [2, 9].

Таким образом, можно констатировать, что виды тополей обладают различной способностью к накоплению тяжелых металлов промышленных выбросов рудообогатительных фабрик. Наибольшими накопителями являются *P. italica* и *P. deltoides*, в то же время у вышеперечисленных интродуцентов процессы поражения мембранных структур проходят менее интенсивно, чем у *P. simonii* и *P. candicans*. Этим, по-видимому, и объясняется большая устойчивость *P. italica* и *P. deltoides* не только к газообразным токсикантам, но и к тяжелым металлам.

1. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растения. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.

2. Антипов В.Г. Устойчивость древесных растений к промышленным газам. – Минск: Наука и техника, 1979. – 214 с.

3. Владимиров Ю.А., Арчаков А.И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. – М.: Наука, 1972. – 252 с.

4. Гришко В.Н., Сыщиков Д.В. Перекисное окисление липидов и функционирование некоторых антиокислительных ферментных систем у кукурузы и овса при остром поражении фтористым водородом // Укр. биохим. журн. – 1999. – 71, № 3. – С. 51–57.

5. Гришко В.М., Сищикова О.В., Данильчук О.В. Вміст різних за рухомістю форм важких металів в едафотопях, що зазнають техногенного впливу // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Біологія. Екологія. – 2002. – Вип. 10. – С. 181–185.

6. Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам // Физиол. и биох. культ. растений. – 1994. – 26, № 2. – С. 107–117.

7. Данильчук А.В., Гришко В.Н. Процессы перекисного окисления липидов в листьях у растений рода *Populus* в условиях загрязнения среды тяжелыми металлами // Тез. докл. междунар. науч. конф., посвященной 70-летию со дня основания ЦБС. – Минск, 2002. – С. 80–81.

8. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1991. – 151 с.

9. Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. – К.: Наук. думка, 1978. – 246 с.

10. Кабата Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

11. Коршиков И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. – К.: Наук. думка, 1996. – 213 с.

12. Коршиков И.И., Котов В.С., Михеенко И.П. и др. Взаимодействие растений с техногенно загрязненной средой. – К.: Наук. думка, 1995. – 192 с.

13. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М.: ЦИНАО, 1989. – 62 с.

14. Пересыпкина Т.Н. Изучение видовой специфики накопления тяжелых металлов для целей фитоиндикации // Тез. міжнар. конф. "Проблеми сучасної екології". – Запоріжжя, 2002. – С. 9.

15. Guillermo S.-M.E., Cogliatti D.H. The regulation of zinc uptake in wheat plants // Plant Sci. – 1998. – 137, No 1. – P. 1–12.

16. Volschenk C.G., Hunter J.J., Watts J.E. The effect of different zinc levels on the growth of grapevines // J. Plant Nutr. – 1996. – 19, No 6. – P. 827–837.

Рекомендовал к печати О.Б. Блюм

В.М. Гришко, О.В. Данильчук

Криворізький ботанічний сад НАН України,
Україна, м. Кривий Ріг

ВМІСТ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
ТА ПРОДУКТІВ ПЕРИКИСНОГО
ОКИСЛЕННЯ ЛІПІДІВ У ТОПОЛЬ
В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ

Досліджена залежність між нагромадженням важких металів та вмістом дієних кон'югатів, дієнетонів і ТБК-активних продуктів в асиміляційному апараті *Populus deltoides* Marsh., *P. italica* Moench, *P. simonii* Carr., *P. candicans* Ait., які зростають в умовах з різним рівнем забруднення. Показана видоспецифічність нагромадження заліза, марганцю, цинку, нікелю, міді, свинцю і кадмію інтродуцентами. Встановлено статистично достовірне збільшення вмісту продуктів перекисного окислення ліпідів у листках тополей, які зростають в умовах забруднення.

V.N. Grishko, A.V. Danilchuk

Kriviy Rig Botanical Garden, National Academy
of Sciences of Ukraine, Ukraine, Kriviy Rig

CONTENTS OF HEAVY METALS
AND PEROXIDE LIPIDS OXIDATION
PRODUCTS AT POPLARS IN THE
CONDITIONS OF CONTAMINATION

The dependence between accumulation of heavy metals and maintenance of dien conjugates, dyenketones and TBA-active products in the assimilation apparatus of *Populus deltoides* Marsh., *P. italica* Moench, *P. simonii* Carr., *P. candicans* Ait., which grow in conditions with a different degree of pollution is investigated. Species specificity of iron, manganese, zinc, nickel, copper, lead and cadmium accumulations by the introducents is shown. The reliable increase of maintenance of peroxide lipids oxidation products in the leaves of poplars sprouting in the conditions of contamination is set statistically.