

**СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ХВОЕ СОСНЫ КРЫМСКОЙ
В НАСАЖДЕНИЯХ КРЫМА И ТЕХНОГЕННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ ПРИАЗОВЬЯ**

І.І. Коршиков, С.О. Бичков

Донецький ботанічний сад НАН України

**ВМІСТ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ХВОЇ СОСНИ КРИМСЬКОЇ У НАСАДЖЕННЯХ КРИМУ
І ТЕХНОГЕННО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ ПРИАЗОВ'Я**

Порівнюється вміст заліза, марганцю та міді у дворічній хвої сосни кримської в інтродуційних насадженнях, що зазнали вплив викидів великих металургійних комбінатів м. Маріуполя, та у рослин у природному ареалі Криму. В інтродукованих рослинах виявлені: надмірне накопичення у хвої тільки заліза й марганцю, висока індивідуальна варіабельність у вмісті цих металів, відсутність взаємозв'язку між рівнем їх накопичення та генотипічними особливостями рослин, а також їх стійкістю до дії аерополітантів.

Ключові слова: Pinus pallasiana, хвоя, накопичення важких металів, генетична мінливість.

I.I. Korshikov, S.A. Bychkov

The Donetsk Botanical Gardens N.A.S. of Ukraine

**THE CONTENT OF HEAVY METALS IN PINUS PALLASIANA D. DON NEEDLES
IN PLANTATIONS OF THE CRIMEA AND THE INDUSTRIALLY POLLUTED
TERRITORIES OF THE AZOV SEA COAST**

The comparative analysis of the content of iron, manganese and copper in the *Pinus pallasiana* needles of the two-year growth in the introductational plantations, exposed to emissions of the large-scale metallurgical plants of Mariupol and in the Crimea natural population has been performed. An excessive accumulation of iron and manganese solely was revealed in the needles of the introduced plants, as well as the high individual variability of these metals' content and absence of correlation of the level of their accumulation with the genotypic peculiarities of the plants, and also with their tolerance to the aeropollutants.

Key words: Pinus Pallasiana, needles, accumulation of heavy metals, genetic variation.

Содержание отдельных металлов в листьях древесных растений, произрастающих вблизи и на территориях предприятий черной и цветной металлургии, может в десятки, а иногда и в сотни раз превышать их уровень в листьях растений фоновых и незагрязненных зон (Парибок, 1983; Тарабрин, 1980б; Взаимодействие растений ..., 1995). Это связывают с пассивным и активным поступлением металлов в ассимиляционные органы растений из загрязненной атмосферы (Тарабрин, 1980б; Парибок, 1983). Аэрозоли тяжелых металлов могут поступать через устьица, а металлы из оседающих на поверхность листьев пылевых частиц пассивно проникают в их покровные ткани (Ормрод, 1988). Этот путь транслокации тяжелых металлов обычно ограничен и зависит от погодных-климатических условий, физико-химических характеристик пылевых частиц, видовых структурно-морфологических, возрастных особенностей и функционального состояния листьев растений. Отличия в индивидуальных уровнях накопления тяжелых металлов у растений локальной популяции могут зависеть от их генотипических особенностей, определяющих их устойчивость, фенотипическую выраженность морфо-анатомических признаков ассимиляционных органов, их функциональное и жизненное состояние (Взаимодействие растений ..., 1995; Коршиков, 1996).

Считается, что определение тяжелых металлов в надземных органах растений может быть альтернативой отбора проб воздуха с целью анализа его загрязненности (Ормрод, 1988). В степных районах для определения зон загрязненности среды вокруг металлургических производств также используют древесные растения, в большинстве случаев – это интродуценты. В такого рода мониторинговых исследованиях, особенно в крупных промышленных районах, возникает проблема экологически чистого контроля (Воробейчик и др., 1994; Взаимодействие растений ..., 1995). В отношении некоторых видов-интродуцентов эту проблему можно решить, используя растения сопредельного природного ареала, где условия их обитания близки к оптимальной норме. С этих позиций для степной зоны Украины перспективным видом является сосна крымская (*Pinus pallasiana*

D. Don), которая достаточно широко используется в озеленении промышленных производств и индустриальных городов (Терлига, 1999; Бичков, 2000), а общая площадь интродукционных насаждений в несколько раз превышает площадь ее природных популяций в Крыму (Белобородов и др., 1992).

Цель работы – сравнительный анализ содержания тяжелых металлов в хвое сосны крымской (*Pinus pallasiana D. Don*) в насаждениях Приазовья, подвергающихся воздействию выбросов металлургических производств г. Мариуполя, и в насаждениях Крыма, а также выяснение взаимосвязи между уровнем накопления металлов и генотипическими особенностями растений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований служили молодые 23–27-летние растения сосны крымской в трех разноудаленных от металлургических комбинатов г. Мариуполя лесонасаждениях. Два загородных насаждения *КАМ* и *Х*, удаленные от этих комбинатов на 5 и 20 км, были выбраны в зоне основных ветров, а насаждение *Ф* находилось в черте города в 5 км от основных источников выбросов, но с противоположной стороны. В Горном Крыму выбирали растения приблизительно такого же возраста из лесонасаждения в среднем ярусе гор, где нет каких-либо антропогенных источников загрязнения среды тяжелыми металлами. Отбор хвои второго года проводили отдельно с 17–27 растений в период их естественного покоя. Содержание железа, марганца, цинка и меди, как наиболее распространенных в выбросах предприятий черной металлургии металлов (Тарабрин, 1980 а), определяли в объединенных образцах каждой пробной площади. В насаждении *КАМ*, наиболее подверженном воздействию выбросов металлургического комбината, эти металлы определяли индивидуально у 10 растений. Содержание металлов в двухлетней хвое растений определяли рентгено-флуоресцентным методом на приборе «Спектроскан». Повторность определений – 5-кратная.

Для изоферментного анализа использовали здоровые семена 27 растений пробной площади *КАМ*. Электрофорез 9-ген-ферментных систем проводили в 7,5 %-ном полиакриламидном геле с последующим проявлением зон ферментной активности по общепринятым методикам. При анализе уровня генетической изменчивости применяли стандартные методы и показатели, которые используются в популяционно-генетических исследованиях (Коршиков и др., 2000).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В хвое сосны крымской в насаждениях Мариуполя и его окрестностей в избыточных количествах по сравнению с растениями Крыма накапливаются марганец и железо (табл. 1). Минимальный уровень накопления этих металлов обнаружен у растений в загородном лесонасаждении (*Х*), удаленном примерно на 20 км от ближайшего источника выбросов. Содержание марганца в хвое растений этой пробной площади было в 1,1, а железа – в 1,9 раза выше, чем в хвое растений Крыма. Максимальные уровни накопления этих металлов обнаружены в хвое растений, испытывающих хроническое прямое действие эмиссий аглофабрики металлургического комбината (*КАМ*). Превышение в сравнении с растениями Крыма в отношении марганца было в 2,1 раза, а железа – в 6,9 раза. Только у растений этой пробной площади отмечено и избыточное накопление меди – примерно на 7 % выше, чем у растений Крыма. Обнаруженные уровни накопления металлов в хвое сосны крымской были меньше, чем в листьях древесных растений, произрастающих в зонах загрязнения выбросами металлургического комбината «Североникель», где содержание отдельных тяжелых металлов было в 6–7 раз, а железа – в 14 раз выше, чем у растений условно-фонового района (Лукина, Никонов, 1993). Высокий уровень накопления железа выявлен и в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в лесонасаждении вблизи этого комбината. При этом соотношение Fe/Mn с увеличением уровня загрязненности среды изменяется в хвое от 0,1 до 1,8. Сходные тенденции отмечены и для лиственных пород (Лукина, Никонов, 1993).

Соотношение Fe/Mn в хвое сосны крымской в Крыму составило 2,2, а в изучаемых насаждениях Мариуполя изменялось в пределах 3,9–7,4. В исследованиях В.П. Тарабрина (1980) показано, что соотношение Fe/Mn в конце вегетации в листьях шести видов древес-

ных растений Мариупольской лесной опытной станции, не подвергающихся эмиссиям металлургических производств, изменяется в пределах 1,2–2,4. Содержание железа было заметно выше, чем марганца, и в листьях 24 видов древесных растений, произрастающих на территории крупного индустриального города Донбасса, в центральной части которого расположен металлургический комбинат (Взаимодействие растений ..., 1995). Превышение содержания железа над марганцем в ассимиляционных органах древесных растений в насаждениях юго-востока Украины – обычное явление, и при загрязнении выбросами металлургических производств соотношение Fe/Mn существенно возрастает за счет более высокого уровня накопления железа (Тарабрин, 1980; Взаимодействие растений ..., 1995).

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в двухлетней хвое сосны крымской в насаждениях Крыма и Приазовья, мг/кг

Пробная площадь	Железо	Марганец	Цинк	Медь
Мариуполь:				
Ф	944,00 ± 28,06* CV = 5,9 %	172,55 ± 2,43* CV = 2,8 %	45,29 ± 0,56 CV = 2,5 %	3,34 ± 0,09 CV = 5,5 %
Х	599,50 ± 15,18* CV = 5,1 %	152,25 ± 2,39* CV = 3,1 %	42,80 ± 2,63 CV = 12,3 %	3,09 ± 0,20 CV = 12,9 %
КАМ	2174,00 ± 135,32* CV = 12,5 %	294,25 ± 2 0,44* CV = 13,9 %	48,80 ± 0,41 CV = 1,7 %	3,50 ± 0,04* CV = 2,4 %
Объединенная по Крыму	314,75 ± 7,10 CV = 4,5 %	140,60 ± 3,09 CV = 4,4 %	47,86 ± 1,62 CV = 6,8 %	3,27 ± 0,06 CV = 3,6 %

* Различия достоверны между растениями Крыма и Приазовья при $\alpha < 0,05$. CV – коэффициент вариации.

В насаждении КАМ, где установлен наиболее высокий уровень аккумуляции железа и марганца в хвое сосны крымской, были выделены две группы растений с высокой и низкой повреждаемостью и сохранностью хвои. Примечательным является тот факт, что средние показатели содержания тяжелых металлов в хвое устойчивых и неустойчивых к аэротехногенным воздействиям групп особей сосны крымской очень мало отличались (табл. 2).

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в двухлетней хвое групп особей сосны крымской, различающихся по устойчивости к аэротехногенному загрязнению в условиях Мариуполя, мг/кг

Группы особей	Железо	Марганец	Цинк	Медь
Устойчивые	2725,4 ± 120,8 CV = 21,7 %	326,5 ± 10,0 CV = 15,0 %	48,58 ± 1,01 CV = 10,2 %	3,64 ± 0,09 CV = 12,2 %
Неустойчивые	2716,0 ± 115 CV = 18,9 %	321,5 ± 14,2 CV = 19,8 %	46,10 ± 1,19 CV = 11,5 %	3,40 ± 0,10 CV = 13,3 %

CV – коэффициент вариации.

И минимальные, и максимальные уровни накопления этих металлов (мг/кг) для группы устойчивых (У) и неустойчивых (Н) особей были близкими:

- цинк – У – 40,5–52,8, Н – 44,1–48,4;
- медь – У – 3,0–4,1, Н – 3,3–3,6;
- марганец – У – 252,8–383,3, Н – 240,0–424,8;
- железо – У – 1880–3577, Н – 2017–345.

Для растений обеих групп характерны высокие индивидуальные отличия в уровнях накопления в хвое марганца и железа. Наиболее высокий уровень накопления железа (3577 мг/кг) и максимальное соотношение Fe/Mn (9,4) были обнаружены у растений из группы устойчивых особей. Анализ содержания железа и марганца в хвое десяти растений сосны крымской показал, что в условиях техногенно загрязненной среды их избыточное накопление имеет высокую степень сопряженности ($r = 0,945$).

Таким образом, индивидуальные отличия в устойчивости сосны крымской к поллютантам в насаждениях Мариуполя не определяются уровнем накопления изучаемых тяжелых металлов. Вероятно, основными токсичными агентами в эмиссиях металлургических комбинатов Мариуполя являются серо- и азотсодержащие газы (окислы серы и азота, сероводород, сероуглерод, аммиак и др.), в значительных количествах выбрасываемые этими производствами (Экология Мариуполя, 1997). Низкую по сравнению с ожидаемой токсичность металлов, поступающих из воздуха в листья, объясняют тем, что значительное их количество локализуется в кутикуле и клеточных стенках в форме инертных соединений и только небольшая часть проникает в цитоплазму клеток (Ормрод, 1988).

Индивидуальные различия в уровнях аккумуляции металлов в хвое сосны крымской могут быть обусловлены генотипическими особенностями растений, определяющими функциональное состояние их метаболических и защитных систем в неблагоприятных условиях техногенно загрязненной среды интродукционного ареала. Считается, что высокая степень генетической изменчивости способствует адаптации древесных растений к условиям загрязненной среды (Geburek, Scholz, 1988; Коршиков, 1996), а более гетерозиготные особи должны обладать и большей жизнестойкостью в техногенных экотопях (De Hayles, Hawley, 1992). Как показали предыдущие наши исследования, устойчивая и неустойчивая выборки молодых растений сосны крымской насаждений г. Мариуполя заметно не различались по основным показателям аллозимного полиморфизма (Коршиков, Бычков, 2001). Существовала вероятность, что эти отличия будут свойственны группам растений с высоким и низким уровнями аккумуляции железа и марганца. Однако анализируемые выборки растений сосны крымской незначительно отличались по уровню гетерозиготности (табл. 3).

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов и основные показатели генетического полиморфизма в выборках деревьев сосны крымской, различающихся по уровню накопления железа и марганца в двухлетней хвое

Уровень накопления металлов	Металлы, мг/кг				Доля полиморфных локусов (P ₉₉)	Среднее число аллелей с частотой > 1%	Гетерозиготность ожидаемая
	железо	марганец	цинк	медь			
Высокий	3187,4 ± 162,01	358,4 ± 20,69	48,11 ± 1,48	3,59 ± 0,13	0,579	1,632	0,224 ± 0,036
Низкий	2257,4 ± 135,56	280,8 ± 15,49	46,27 ± 2,00	3,35 ± 0,12	0,579	1,684	0,228 ± 0,036
Итого по насаждению	2722,4 ± 184,22	319,6 ± 17,76	47,19 ± 1,21	3,47 ± 0,09	0,700	2,150	0,244 ± 0,019

Объяснить это малочисленностью выборок достаточно проблематично, так как обнаруженный уровень гетерозиготности был близок к среднему ее уровню в целом по изучаемому насаждению. Следует отметить, что средний уровень гетерозиготности в этом насаждении был не ниже, чем в природных популяциях сосны крымской в Горном Крыму (Коршиков и др., 2000). Вероятно, индивидуальная устойчивость сосны крымской

в условиях аэротехногенного загрязнения, как и уровень накопления в хвое металлов, определяется не только уровнем гетерозиготности, но и тканеспецифическими и экспрессирующими во всех клетках на всех стадиях развития кластерами генов, обеспечивающими генотипу, как это показано на примере других организмов, системную реакцию на экстремальные воздействия среды (Алтухов и др., 1996).

Таким образом, в хвое сосны крымской в насаждениях Мариуполя и его окрестностей происходит избыточное накопление марганца и особенно железа вследствие аэротехногенного загрязнения выбросами металлургических комбинатов. А вот повышенного содержания меди и цинка в хвое растений не обнаружено. Лесонасаждения сосны крымской в степной зоне Украины можно применять в мониторинговых исследованиях загрязненности атмосферы аэрозолями тяжелых металлов, а в качестве эталонного контроля использовать растения из природных местообитаний Крыма.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Алтухов Ю.П., Корочкин Л.И., Рычков Ю.Г. Наследственное биохимическое разнообразие в процессах эволюции и индивидуального развития // Генетика. – 1996. – Т. 32, № 11. – С. 1450-1473.
Белобородов В.М., Ширяев В.И., Патлай И.Н. Интродуценты в лесных культурах европейской части страны // Лесн. хоз-во. – 1992. – № 8-9. – С. 38-39.

Бичков С.А. Интродукційний потенціал *Pinus pallasiana* D. Don і *Pinus sylvestris* L. у техногенно забруднених територіях Приазов'я: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. – К., 2000. – 21 с.

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

Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 280 с.

Коршиков И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. – К.: Наук. думка, 1996. – 240 с.

Коршиков И.И., Терлыга Н.С., Бичков С.А. Генетическая изменчивость сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) вдоль высотного профиля в Горном Крыму // Докл. НАН Украины. – 2000. – № 2. – С. 157-161.

Коршиков И.И., Бичков С.А. Сравнительный анализ генетической изменчивости двух групп деревьев сосны крымской, отличающихся по степени повреждаемости поллютантами в насаждениях г. Мариуполя // Цитология и генетика. – 2001. – № 1. – С. 35-46.

Лукина Н.В., Никонов В.В. Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // Лесоведение. – 1993. – № 6. – С. 34-41.

Ормрод Д.П. Воздействие загрязнения микроэлементами на растения // Загрязнение воздуха и жизнь растений / Под ред. М. Трешоу. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – С. 327-356.

Парибок Т.А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Эколого-физиологические исследования. – Ленинград: Наука, 1983. – С. 82-90.

Тарабрин В.П. Физиология устойчивости древесных растений в условиях загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // Микроэлементы в окружающей среде. – К., 1980 а. – С. 17-19.

Тарабрин В.П. Устойчивость растений к промышленному загрязнению окружающей среды // Промышленная ботаника / Под общ. ред. Е.Н. Кондратьюка. – К.: Наук. думка, 1980 б. – С. 52-108.

Терлыга Н.С. Адаптивна мінливість сосни кримської (*Pinus pallasiana* D. Don) в насадженнях Кривбасу: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. – К., 1999. – 20 с.

Экология Мариуполя / М.А. Поживанов, П.М. Семенченко, И.В. Буторина и др. – Мариуполь: Стратегия, 1998. – 224 с.

De Hayles D.H., Hawley G.L. Genetic Implications in the decline of red spruce // Water, Air and Soil Polut. – 1992. – Vol. 62, № 3-4. – P. 233-248.

Geburek Th., Scholz F. Versuche mit Waldbaumpopulationen von Fichte und Birke zur Viabilitätsselektion // GKSS. – 1988. – № E55. – S. 383-387.

Jäger E.J. Indikation von Luftverunreinigungen durch morphometrische Untersuchungen an Hogeren Pflanzen // Bioindikation. – Halle-Witterberg: Martin-Luther-Univ., 1980. – Teil. 3. – S. 43-52.

Надійшла до редколегії 10.01.02