

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИВЫ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ЗЕМЛЯХ

Е. Урошевич¹⁾, Д. Станкович²⁾, Б. Крстич³⁾, О.Родькин⁴⁾

¹⁾ ЧП «Электропривреда Србие» (Электроснабжающая компания, Балканская 13, 11000, Белград, Сербия, urosevicj75@gmail.com)

²⁾ Институт междисциплинарных исследований Белградского университета, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Белград, Сербия, dstankovic@imsi.bg.ac.rs

³⁾ Университет Нови Сад, Факультет Биологии и экологии, Trg Dositeja Obradovića 2, г. Novi Sad 21000, Сербия, borivoj.krstic@dbe.uns.ac.rs

⁴⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, aleh.rodzkin@rambler.ru

Повышенные концентрации тяжелых металлов приводят к деградации почвы, снижению урожайности растений и снижению качества сельскохозяйственной продукции, что напрямую угрожает людям, животным и экосистеме. Оценка потенциала накопления тяжелых металлов в биомассе растений ивы различных клонов проводилась в экологических условиях Сербии и Республики Беларусь. По результатам экспериментов можно констатировать, что несмотря на различие природно-климатических условий наблюдается, что одни клоны ивы даже одного вида накапливают тяжелые металлы более интенсивно. Этот фактор позволяет в определенной степени прогнозировать и регулировать вынос тяжелых металлов с биомассой, что необходимо учитывать при использовании биомассы.

Ключевые слова: растения ивы; клоны; почва; тяжелые металлы; биомасса.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF CULTIVATION OF ENERGY WILLOW ON LANDS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

J. Urošević¹⁾, D. Stanković²⁾, B. Krstić³⁾ O. Rodzkin⁴⁾

¹⁾ PE «Elektroprivreda Srbije» (Electrical Power Supply Company), Balkanska 13, 11000 Belgrade, Serbia, urosevicj75@gmail.com

²⁾ Institute for Multidisciplinary Research, University of Belgrade, Kneza Višeslava 1, 11000 Belgrade, Serbia, dstankovic@imsi.bg.ac.rs

³⁾ University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 2, Novi Sad 21000, Serbia, borivoj.krstic@dbe.uns.ac.rs

⁴⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, aleh.rodzkin@rambler.ru

Increased concentrations of heavy metals lead to soil degradation, reduced plant productivity and lower agricultural product quality, which poses a direct threat to people, animals, and the ecosystem. The assessment of the potential for accumulation of heavy metals in the biomass of willow plants of various clones was carried out in the ecological conditions of Serbia and the Republic of Belarus. Based on the experimental results, it can be stated that despite the difference in natural and climatic conditions, it is observed that some willow clones of even the same species accumulate heavy metals more intensively. This factor allows to a certain extent to predict and regulate the removal of heavy metals with biomass, which must be taken into account when using biomass.

Keywords: willow plants; clones; soil; heavy metals; biomass.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-251-254>

Введение

Химические элементы, атомная плотность которых превышает 5 г/см^3 , классифицируются как тяжелые металлы. Наибольшее загрязнение окружающей среды вызывают такие металлы и металлоиды, как мышьяк (As), кадмий (Cd), хром (Cr), медь (Cu), свинец (Pb), никель (Ni), ртуть (Hg), селен (Se), серебро (Ag), цинк (Zn), алюминий (Al), цезий (Cs), кобальт (Co), марганец (Mn), молибден (Mo), стронций (Sr) и уран (U) [1]. Следует отметить, что некоторые из них, в небольших концентрациях, необходимы для оптимального роста и развития растений (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Co и Mo), в то время как другие оказывают вредное воздействие даже при очень низких концентрациях в почве, воде и атмосфере и определяются как загрязнители окружающей среды (Cd, Pb, Hg и Cr) [2]. Хотя накопление и концентрация тяжелых металлов в окружающей среде является следствием естественных литогенных и педогенных процессов, крупнейшие источники тяжелых металлов имеют антропогенное происхождение [3]. Независимо от происхождения, повышенные концентрации тяжелых металлов в почве приводят к ее деградации, снижению урожайности растений и ухудшению качества сельскохозяйственной продукции, что подвергает опасности людей, животных и экосистемы [4; 5].

Последствия, которые могут возникнуть из-за присутствия тяжелых металлов в окружающей среде, зависят от размера и типа загрязнения, а также синергетического действия с другими загрязнителями, но главная проблема заключается в том, что тяжелые металлы не могут быть уничтожены, а только перемещены в зоны биосферы, где их воздействие будет менее пагубным, то есть трансформированы и депонированы в неактивные химические формы [6].

Одним из подходов к рекультивации почв является фиторемедиация, которая считается экологической альтернативой химическим технологиям [6]. По данным Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [7], фиторемедиация определяется как технология, которая использует растения и их ризосферные микроорганизмы для удаления, разложения или фиксации вредных химических веществ, присутствующих в почве, подземных и поверхностных водах, а также в атмосфере. Во многих развитых странах фиторемедиация была принята в качестве подходящей стратегии для рекультивации почв, загрязненных тяжелыми металлами, из-за ее всеобщего признания общественностью и многочисленных преимуществ этого метода по сравнению с другими методами физико-химической рекультивации. Это метод, который приносит выгоду от низких инвестиций и затрат на техническое обслуживание по сравнению с другими формами рекультивации [9]. Фиторемедиация в форме фитоэкстракции это технология, которая удаляет тяжелые металлы, металлоиды и радионуклиды из окружающей среды с использованием подходящих видов и генотипов растений, способных поглощать все эти загрязнители и накапливать их в частях растительной ткани [2]. Такой подход подразумевает использование растений, способных поглощать загрязняющие вещества через корневую систему и переносить и/или накапливать их в надземных частях – стебле и листьях. Преимущество быстрорастущих видов листовенных деревьев, таких как виды из рода *Salix* (ива), заключается именно в этой способности, поэтому их можно использовать для рекультивации местообитаний, загрязненных различными агентами, в том числе тяжелыми металлами.

Как перспективная культура фиторемедиации, ивы изучались с начала последнего десятилетия 20-го века. Исследования показали выраженную способность этих видов поглощать и накапливать большие количества Zn и Cd. Также было показано, что концентрации Cd, Zn и Cu в почве уменьшаются после рекультивации с помощью ивы прутовидной (*Salix viminalis* L.). При этом было установлено, что потенциал фитоэкстракции тяжелых металлов во многом зависит от конкретных характеристик генотипов ивы, в том смысле, что определенные генотипы ив могут извлекать больше тяжелых металлов из почвы по сравнению с другими генотипами того же вида.

С другой стороны, необходимо учитывать, при высоком уровне содержания тяжелых металлов в почве их концентрация в продукции (биомассе) может достигать нежелательных для экологически безопасного использования величин. Таким образом, необходимо использовать механизм позволяющий в определенной степени прогнозировать и регулировать вынос тяжелых металлов с биомассой.

Возможность осуществления такого подхода основано на следующих предположениях:

- существует возможность использования различных генотипов ивы для фиторемедиации почвы, загрязненной тяжелыми металлами;
- существуют различия между генотипами с точки зрения способности фитоэкстрагировать определенные тяжелые металлы из почвы;
- существует потенциал для отбора наиболее эффективных генотипов ивы для фиторемедиации при выращивании плантаций.

Эта научная гипотеза была проверена в экспериментальных исследованиях, представленных в данной публикации.

Место и методы исследований

В Республике Сербия почва для эксперимента была взята из района горнодобывающего бассейна Колубара, перевезена и засыпана на территорию питомника факультета лесного хозяйства Белградского университета. Дополнительно перед посадкой культур субстрат поливали водным раствором солей тяжелых металлов: Cd, Cu, Cr, 207, Na, Ni и Pb. Контролем служили почвы из питомника лесного факультета, где выращивался контрольный растительный материал. Объектами исследований служили: клон ивы вида *Salix viminalis* (№ 1) и три клона ивы вида *Salix alba* (347, NS 73/6 и В-44), номера соответственно 2, 3 и 4.

В Республике Беларусь полевые опыты по оценке содержания и коэффициентов биологического накопления тяжелых металлов в листьях ивы были заложены на легкосуглинистых дерновоподзолистых почвах на Кричевском экспериментальном участке.

Почвы города Кричева и прилегающих территорий являются одними из самых загрязненных тяжелыми металлами в стране, что связано с воздействием ряда промышленных предприятий, в том числе производства цемента. Объектами исследований служили: клон ивы *Jorr* вида *Salix viminalis* и три клона ивы вида *Salix alba* (282, 378 и 373-64/8).

Результаты исследований

Для эффективного культивирования плантаций ивы в различных условиях, в том числе на загрязненных землях, наряду с хозяйственно-полезными признаками особое значение имеют экологические характеристики, такие как коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов [31-А]. Результаты исследований по данному параметру для клонов *Salix alba* представлены в таблице 1. Самые низкие показатели содержания в листьях и коэффициенты биологического накопления всех тяжелых металлов за исключением меди характерны для клона 73-64/8. Для растений сорта *Jorr* характерны более высокие по сравнению с клонами *Salix alba* коэффициенты биологического накопления марганца, цинка и кадмия (за исключением клона 378). Свинец наиболее активно накапливали растения клона 378. По никелю более высокие коэффициенты биологического накопления наблюдались для клонов *Jorr* и 282.

Таблица 1.

Содержание в почве и листьях растений ивы тяжелых металлов и коэффициенты их биологического накопления. Экспериментальный участок Кричев.

	Тяжелые металлы (среднее содержание), мг/кг					
	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn
Почва	1,50	45,11	10,17	3,47	3,42	650,8
<i>Jorr</i>	0,09	183,08	0,67	5,28	0,17	122,0
282	0,07*	109,87*	0,62	8,34*	0,19	77,3*
378	0,09	176,42	1,07	8,55*	0,12*	29,0*
73-64/8	0,05*	95,52*	0,26*	9,30*	0,10*	24,5*
НСР ₀₅	0,02	9,23	0,36	1,09	0,05	18,5

* Статистически значимые по наименьшей существенной разнице (НСР) различия с эталонным сортом *Jorr* при $p < 0,05$

По результатам исследований выполненных в Сербии наиболее активно тяжелые металлы накапливал клон ивы № 4. Потенциал накопления тяжелых металлов во многом зависит от генотипической специфичности растений ив.

Этот фактор в первую очередь относится к Cd и Cr, которые, по сравнению с другими генотипами, в наибольшей степени накапливались клоном 4 (347) и в несколько меньшей степени клоном 2 (В-44). Клон 3 (NS 73/6) белой ивы также обладал выраженной способностью накапливать Cr, в отличие от клона ивы прутовидной.

Заключение

По результатам исследований выполненных в различных климатических зонах можно сделать следующий вывод:

Степень накопления тяжелых металлов ивами зависит от генотипа, и существует специфика генотипов ивы в накоплении тяжелых металлов из почвы. Можно выделить генотипы, избирательные для почвы, загрязненной определенными тяжелыми металлами.

Наибольшая способность к накоплению Ni и Pb у корней, Cu поглощается всеми органами растения, тогда как Cd больше поглощается листьями.

Библиографические ссылки

1. *McIntyre T.* Phytoremediation of heavy metals from soils. *Adv. Biochem. Engin./Biotech.* 2003, 78, 97–123.
2. *Borišev M.* Potential of Willow Clones (*Salix* spp.) in Phytoextraction of Heavy Metals. Ph.D. Dissertation, University of NoviSad, Novi Sad, Serbia, 2010.
3. *Kastori R., Petrović N.; Petrović M.* Effect of lead on water relations, proline concentration and nitrate reductase activity in sunflower plants. *Acta Agron. Acad. Scient. Hungar.* 1996, 44, 21–28.
4. *Blaylock M. J., Huang J. W.* Phytoextraction of metals. In *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*; Raskin, I., Ensley, B. D., Eds.; Wiley: New York, NY, USA, 2000; pp. 53–70.
5. *Long X. X., Yang X. E., Ni W. Z.* Current status and perspective on phytoremediation of heavy metal polluted soils. *J. Appl. Ecol.* 2002, 13, 757–762.
6. *Pilon-Smiths, E.* Phytoremediation. *Ann. Rev. Plant Biol.* 2005, 56, 15–39. [CrossRef] [PubMed]
7. *Pilipović A.; Klačnja B.; Orlović S.* The role of poplar in phytoremediation of soil and groundwater. *Topola* 2002, 169/170, 57–66.