

Заключение. Сравнительная характеристика результатов мониторинга подземных вод показала довольно существенные различия в подборе анализируемых параметров, так и в результатах измерений. В Беларуси наблюдается превышение органогенных загрязнителей, что связано с фильтрацией веществ, возникших в результате хозяйственной деятельности (грунтовые воды). В Автономном крае Воеводина (Республики Сербия) акцент делается на оценке артезианских источников (глубина 100 м и более). Здесь существенное региональное значение имеет загрязнение тяжелыми металлами, особенно мышьяком, что вносит существенные ограничения в использование подземных вод в качестве питьевой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг подземных вод <https://nsmos.by/environmental-monitoring/monitoring-podzemnykh-vod> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 15.02.2024
2. «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы СанПиН 10–124 РБ 99», - Постановление главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 19 октября 1999 г. N 46 О введении в действие санитарных правил и норм (с изм., внесенными постановлением Минздрава от 14.12.2007 N 164
3. Директива Европейского парламента и Совета 2000/60/ЕС от 23 октября 2000 г., устанавливающая рамочные положения о деятельности Сообщества в области водной политики <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/04/Директива-Европейского-парламента-и-Совета-200060ЕС.pdf> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 15.02.2024
4. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ПОВРШИНСКИХ И ПОДЗЕМНИХ ВОДА ЗА 2013. ГОДИНУ / Министарство пољопривреде и заштите животне средине Агенција за заштиту животне средине/ БеоградБ 2014. – 408 с. <https://www.ekourbapv.vojvodina.gov.rs/wp-content/uploads/2018/09/REZULTATI-ISPITIVANJA-KVALITETA-POVR%C5%A0INSKIH-I-PODZEMNIH-VODA-ZA-2013.-GODINU-.pdf> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 15.02.2024
5. Agbaba, J.; Watson, M.; Kragulj Isakovski, M.; Stankov, U.; Dalmacija, B.; Tubić, A. Water Supply Systems for Settlements with Arsenic-Contaminated Groundwater–Making the Right Choice. *Appl. Sci.* 2023, 13, 9557. <https://doi.org/10.3390/app13179557> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 15.02.2024

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЫСТРОРАСТУЩИХ КЛОНОВ ИВЫ ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ЗЕМЕЛЬ USE OF FAST-GROWING WILLOW CLONES FOR PHYTOREMEDIATION OF LANDS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

**О. Родькин¹, Е. Урошевич², Д. Станкович³, Г. Триван², Б. Крстич⁴
A. Rodzkin¹, J. Urošević², D. Stanković³, G. Trivan², B. Krstić⁴**

¹Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
info@iseu.by,

²ЧП «Электропривреда Србие» (Электроснабжающая компания), Колубарский горнодобывающий бассейн, Светог Сава 1, Лазаревац, Республика Сербия
urosevicj75@gmail.com

³Институт междисциплинарных исследований Белградского университета, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Белград, Республика Сербия
dstankovic@imsi.bg.ac.rs, gorantrivan@gmail.com

⁴Университет Нови Сад, Факультет Биологии и экологии, Trg Dositeja Obradovića 2, г. Novi Sad 21000, Республика Сербия
borivoj.krstic@dbe.uns.ac.rs

¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

²ПЕЭлектропривреда Србие “ (Electrical Power Supply Company), Kolubara Mining Basin, Svetog Sava 1, Lazarevac, Republic of Serbia

³Institute for Multidisciplinary Research, University of Belgrade, Kneza Višeslava 1, 11030 Belgrade, Republic of Serbia

⁴University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Biology and Ecology, Trg Dositeja Obradovića 2, г. Novi Sad 21000, Republic of Serbia

Проблема загрязнения окружающей среды соединениями тяжелых металлов является одной из наиболее значимых, так как загрязнители могут интенсивно накапливаться в произведенной продукции. Одним из направлений решения является метод фиторемедиации или использование растений. Полученная с загрязненных территорий биомасса не может использоваться как продовольствие или корм, но пригодна для технических или энергетических целей. Представленные в публикации исследования направлены на оценку эффективности использования быстрорастущих клонов ивы для фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв.

The problem of environmental pollution with heavy metal compounds is one of the most significant, since pollutants can intensively accumulate in food products. One of the solutions is the phytoremediation method or the use of plants. The biomass obtained from contaminated areas cannot be used as food or feed, but is suitable for technical or energy purposes. The studies presented in the publication are aimed at assessing the effectiveness of using fast-growing willow clones for phytoremediation of the soils contaminated with heavy metals.

Ключевые слова: Тяжелые металлы, загрязненные почвы, фиторемедиация, ива, биологическое накопление.

Keywords: Heavy metals, contaminated soils, phytoremediation, willow, accumulation.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-165-169>

Загрязнение окружающей среды обуславливает увеличение содержания вредных соединений в почве, воздухе и воде, а следовательно в растениях и продуктах питания, которые потребляет человек. Наиболее негативное воздействие на организм связано с тяжелыми металлами. Одним из перспективных решений данной проблемы является применение растений для реабилитации загрязненных металлами территорий, то есть создание в таких местообитаниях устойчивых биоценозов, которые обеспечивают фиторемедиацию, то есть восстановление почвенных характеристик, а также позволяют эффективно использовать полученную фитомассу [1].

Название метода происходит от греческого слова «фитон» (растение) и латинского «ремедиум» (восстанавливать). Скорость восстановления или ремедиации почв будет тем выше, чем быстрее растение способно аккумулировать загрязнители. Принципиально важным фактором для фиторемедиации является возможность дальнейшего безопасного использования или утилизации биомассы. Например, хороший потенциал с точки зрения накопления тяжелых металлов имеют растения семейства крестоцветных, как дикорастущих, так и культурных видов. Но, в этом случае остается проблема эффективного использования полученной загрязненной биомассы, потенциально загрязненной соединениями тяжелых металлов. Использование такой биомассы на продовольственные или кормовые цели увеличивает риск накопления загрязнителей в продукции в пищевых цепях.

Таким образом, при оценке эффективности фиторемедиации надо учитывать ряд экологических, а также и экономических факторов. Активная аккумуляция загрязнителя и высокий уровень его содержания в биомассе в сочетании с интенсивным ростом культуры обеспечит быстрые темпы дезактивации почв. Но если биомассу нельзя использовать, то ее экологически целесообразная утилизация сопряжена с дополнительными экономическими затратами. В противном случае, например, при запашке биомассы ее захоронении на полигонах или сжигании речь идет только о перераспределении загрязнителей в экосистемах, и кроме того такая деятельность является экономически нецелесообразной.

В связи с этим более эффективным является направление фиторемедиации которое позволяет постепенно не только улучшать почвенные характеристики, но и одновременно обеспечивать использование биомассы. С этой точки зрения относительно невысокая скорость аккумуляции загрязнителей в продукции позволяет менее интенсивно, но неуклонно очистить почву и рационально использовать выращенную биомассу. Одним из направлений, отвечающих таким требованиям, является выращивание «энергетических» культур, биомасса которых может быть использована как возобновляемый источник для производства зеленой энергии.

Термин энергетические культуры включает травы, деревья и кустарники, выращиваемые для энергетических нужд. Такие культуры характеризуются значительной биомассой и высокими темпами роста. Среди травянистых культур потенциал для фиторемедиации имеют как культурные виды (мискантус), так и тростник, и другие виды естественной болотной растительности. С 70-х годов прошлого века, проводятся исследования по оценке эффективности использования быстрорастущих подвидов и гибридов древесных растений (ивы, тополя, осины, эвкалипта и других) для энергетических целей. Быстрые темпы роста таких видов возможны при селекции и использовании специальных быстрорастущих сортов или клонов. Энергетические или короткоцикловые посадки древесных культур (так как они могут быть использованы уже на 2-3 год после посадки) главным образом используют для получения биотоплива для целей возобновляемой энергетики.

Ивовые плантации, что установлено рядом исследований могут выращиваться на землях, загрязненных тяжелыми металлами. Растения ивы не обладают выраженными аккумулялирующими способностями, но вследствие быстрого прироста биомассы способны эффективно очищать почвы загрязненные Pb, Cd и другими элементами. Например, с одного гектара пашни при выращивании плантации на загрязненных землях с известкованных почв, с древесиной ивы выносилось 170 грамм кадмия и 13,4 кг цинка за пять лет, а с кислых почв 47 г кадмия и 14,5 кг цинка за два года [2].

В таксономическом отношении род ивы *Salix* представляет собой большой комплекс и по некоторым данным включает 350–370 видов [3], тогда как по другим литературным данным отмечается, что насчитывается даже более 400 видов ивы с более чем 200 гибридами [4].

Ива, используемая для производства биоэнергии, изучается как возможная фиторемедиационная культура с 1990-х годов [5]. Исследования показали весьма выраженную способность этих видов поглощать и накапливать большие количества цинка (Zn) и кадмия (Cd), и в то же время растения ивы обеспечивают значительный выход биомассы с единицы площади.

По результатам большого количества исследований можно сделать вывод, что каждый отдельный случай загрязнения тем или иным тяжелым металлом предполагает использование определенных генотипов ивы. Так, исследования, проведенные в различных экологических условиях, показали, что клоны видов *Salix alba* и *Salix dasyclados*, а также гибриды *Salix aurita* и *Salix dasyclados* являются перспективными энергетическими растениями для производства биомассы на деградированных, в том числе загрязненных почвах [5].

В настоящее время в доступной научной литературе не так публикаций посвященных влиянию тяжелых металлов на физиологические и морфометрические показатели растений ивы различных видов.

Целью наших исследований было изучение потенциала генотипов и сортов ивы на основе вида *Salix alba* в отношении фитоэкстракции и адаптации к присутствию в почве ряда тяжелых металлов.

Условия, объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований использовались сорта и перспективные клоны ивы белой *Salix alba*

Растения ивы этого вида все более активно используются в селекционном процессе получения быстрорастущих клонов, которые могут быть эффективно использованы для энергетических целей. В частности, три сорта энергетической ивы, полученные на основе сортообразцов *Salix alba* сербской селекции (Бачка, Волмянка, Дрина) включены в национальный реестр Республики Беларусь. Исследования по оценке коэффициентов накопления тяжелых металлов в фитомассе этих сортов ивы проводились в условиях вегетационного эксперимента который был заложен на опытно-экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси. в МГЭИ им. А. Д. Сахарова. В качестве почвенного субстрата использовали иловые осадки сточных вод которые имеют повышенные концентрации таких тяжелых металлов как кадмий, свинец, никель, цинк, хром. Растения выращивали в вегетационных сосудах объемом 0,019 м³ [6].

В исследованиях, проведенных на факультете лесного хозяйства Белградского университета, изучались перспективные клоны *Salix alba*: В-44, 347 и NS 73/6. Растения высаживались на двух участках: контроль – незагрязненная почва и почва загрязненная тяжелыми металлами. Для дополнительного загрязнения использовали водные растворы солей ряда тяжелых металлов, а именно: Cd(NO₃)₂, CuSO₄, K₂ Cr₂ O₇, Na₂HAsO₄, NiCl₂6H₂O и Pb(NO₃)₂ в концентрациях 10⁻³ моль/ дм³ или в пересчете Cd -112,4; Cu – 63; Cr – 104; As - 74,9; Ni - 58,7 и Pb - 207,2 мг/кг. Растения выращивали в контейнерах объемом 10 л. [7].

В качестве контрольного объекта в обоих экспериментах использовали растения ивы *Salix viminalis*. Растения этого вида наиболее интенсивно используются при селекции энергетической ивы в настоящее время.

Результаты исследований и их обсуждение. Тяжелые металлы, как установлено в многочисленных исследованиях оказывают неблагоприятное воздействие на морфологические показатели растений. Это воздействие в основном выражается в нарушении структуры хлоропластов, синтеза хлорофилла, каротиноидов, деструктивном действии на пигмент-белковые комплексы, конформацию и активность ферментов, перенос электронов в транспортных цепях дыхания и фотосинтеза и другие процессы.

Более интенсивное накопление кадмия и никеля в молодых листьях ивы приводит к нарушению фотосинтетического и дыхательного обмена. Этот уровень сохраняется некоторое время, а по мере старения листа он начинает снижаться, в результате чего старые листья вносят меньший вклад в продукцию органического вещества, чем молодые.

В результате экспериментов на опытном участке в Сербии установлено, что по средним значениям растения всех клонов, полученные на незагрязненной почве, по высоте и другим морфологическим параметрам на 70–90 % превосходили растения, выращенные на почве загрязненной тяжелыми металлами (таблица 1).

Таблица 1

Высота клонов ивы на незагрязненной и загрязненной почве

Контроль - незагрязненная почва			
	2019 год	2020 год	2021 год
I - <i>Salix viminalis</i> – Ива прутовидная	104.2	187.7	206.9
II - <i>Salix alba</i> – клон Б-44	106.8	191.3	216.9
III - <i>Salix alba</i> – клон 347	140.4	272.3	293.5
IV - <i>Salix alba</i> – клон НС 73/6	129.1	162.3	177.4
Загрязненная почва			
	2019 год	2020 год	2021 год
I - <i>Salix viminalis</i> – Ива прутовидная	56,5	114,8	122,1
II - <i>Salix alba</i> – клон Б-44	43,8	111,2	110,4
III - <i>Salix alba</i> – клон 347	61,4	132,8	125,5
IV - <i>Salix alba</i> – клон НС 73/6	66,1	119,4	119,8

Полученные результаты показывают, что растения, выращенные на загрязненной почве, почти в два раза меньше по высоте ($H_{sr} = 120$ см), чем контрольные (незагрязненной почве) растения ($H_{sr} = 223$ см). При этом наблюдалась специфичность клонов к условиям произрастания. Если на незагрязненной почве выделялись растения варианта № 3, то на загрязненной растения 4-го варианта.

Специфичность сортов ивы к накоплению тяжелых металлов подтверждается результатами экспериментов, проведенных в условиях Беларуси (рисунок 1). В соответствии с полученными результатами можно констатировать наличие сортовой специфичности к накоплению тяжелых металлов на почвенных субстратах на основе твердых осадков сточных вод. Более низкие показатели содержания кадмия, свинца, никеля и хрома установлены для сорта Дрина. Содержание в биомассе сорта Дрина цинка незначительно отличалось от сорта Бачка. Наиболее интенсивная аккумуляция тяжелых металлов наблюдалась у сорта Ингер, который относится к сортам интенсивного типа.

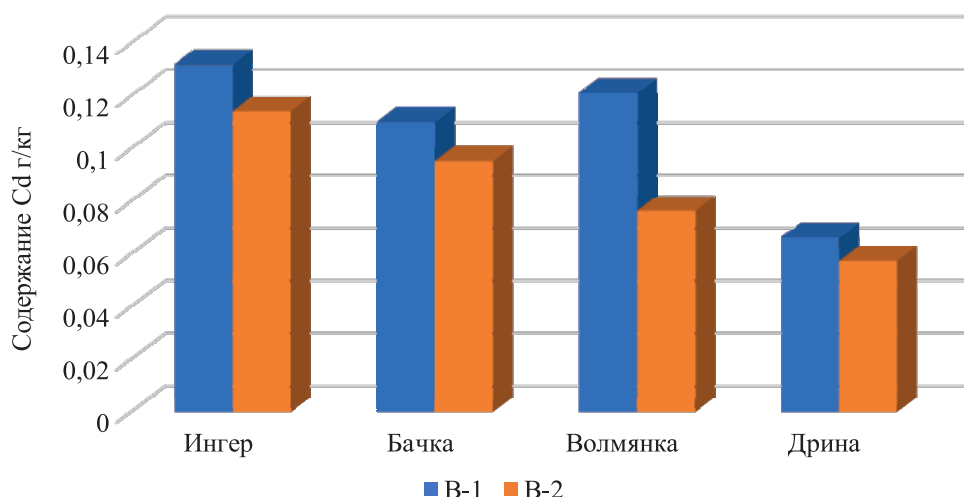


Рисунок 1 – Содержание кадмия в фитомассе сортов ивы на двух типах почвы

Коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов также зависят от сорта растений. Наиболее низкие коэффициенты биологического накопления характерны для сорта Дрина (таблица 2).

Таблица 2
Коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов в фитомассе растений ивы

Сорт	Cd		Pb		Ni		Cr		Zn	
	В-1	В-2	В-1	В-2	В-1	В-2	В-1	В-2	В-1	В-2
Ингер	0,066	0,050	0,058	0,068	0,057	0,059	0,262	0,131	3,013	4,600
Бачка	0,055	0,041	0,049	0,057	0,069	0,071	0,160	0,080	1,808	2,849
Волмянка	0,061	0,033	0,044	0,063	0,046	0,047	0,058	0,029	1,904	2,907
Дрина	0,033	0,025	0,019	0,023	0,034	0,035	0,044	0,022	1,570	2,551

Наиболее высокие коэффициенты биологического накопления наблюдались для сорта Ингер. Рассчитанные показатели биологического накопления позволяют прогнозировать содержание тяжелых металлов в биомассе растительной продукции. Очевидно, что этот фактор необходимо принимать во внимание при планировании использования субстратов на основе твердых осадков сточных вод для получения биомассы различного назначения.

Заключение. Основным фактором, определяющим поиск альтернативных технологий рекультивации, в том числе фиторемедиации является стоимость. Необходимо, также, чтобы процедуре фиторемедиации предшествовал учет таких факторов, как свойства почвы, наличие и тип загрязняющих веществ, климат, тип растений и т. д.

В соответствии с представленными по результатам экспериментов данными можно сделать следующие выводы:

- Быстрорастущие клоны ивы могут эффективно использоваться для получения биомассы на загрязненных тяжелыми металлами землях, но необходимо учитывать фактор снижения продуктивности, величина которого зависит от клона и вида растений. Полученные результаты показывают, что растения, выращенные на загрязненной почве, почти в два раза меньше по высоте ($H_{sr} = 120$ см), чем контрольные (незагрязненной почве) растения ($H_{sr} = 223$ см). Тем не менее рубку (уборку) можно производить у растений после второго года жизни на обоих вариантах – загрязненной и незагрязненной почве;

- Коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов в фитомассе растений ивы также зависят от вида растений ивы. Проведенный дискриминантный анализ (КДА) на содержание тяжелых металлов (мг/кг) в органах растительного материала четырех генотипов ивы свидетельствуют о том, что способность накапливать тяжелые металлы у биомассы на незагрязненной и загрязненной землях различий между анализируемыми

органами и генотипами ивы. Этот фактор необходимо учитывать при оценке возможности хозяйственного использования биомассы в том числе в энергетических целях.

- Для эффективной рекультивации загрязненных тяжелыми металлами почв с учетом использования наземной биомасс необходимо учитывать ряд экологических и экономических факторов. К экологическим факторам относится дезактивация почв от загрязнителей, которую рекомендуется осуществлять при одновременном использовании растительной биомассы. Быстрые темпы дезактивации почв может обеспечить интенсивная аккумуляция загрязнителя в биомассе культуры в сочетании с быстрыми темпами роста и накоплением биомассы. Экологически целесообразная утилизация несмотря на дополнительные экономические затраты позволит производить продукцию на основе биомассы для дальнейшего использования;

- Одним из направлений, отвечающих таким требованиям, является выращивание «энергетических» культур, биомасса которых может быть использована как возобновляемый источник для производства зеленой энергии. Перспективным направлением биоэнергетики является использование короткоциклового плантаций древесных культур для целей рекультивации, эффективность которого обуславливается быстрыми темпами роста и соответственно накопления биомассы и тем, что однократно заложенная плантация может расти на том же месте более 20 лет не теряя продуктивности, при этом уборка биомассы осуществляется каждые 3-4 года. Следовательно, перераспределение загрязнителей в другие экосистемы за этот период будет минимальным. Кроме того, экспериментально установлено, что себестоимость единиц энергии производимой из биомассы короткоциклового плантаций ивы существенно ниже по сравнению с другими энергетическими культурами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pilon-Smiths, E. (2005): Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology 56: p. 15–39.
2. Landberg, T., Greger, M. (1996): Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. Appl. Geochem, 11, p. 175–180.
3. Тахтаджян, Л. А. (1981): Цветковые растения (Flowering plants) Том пятый, Часть вторая, Просвещение, Москва, 81–86.
4. Newsholme, C. (1992): Willows: The Genus *Salix*. Batsford. London. Ltd. p. 224. No 129, 7-16.
5. Landberg T, Greger M. (1994): Can heavy metal tolerant clones of *Salix* be used as vegetation filters on heavy metal contaminated land? In: Aronsson, P., Perttu, K. (Eds.). Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, pp. 133–144.
6. Urošević J.D., Rodzkin O.I., Stanković D.M. ... Trivan G.Dj. Jovanović, F. A The influence of heavy metals on morphological and physiological parameters of *Salix* clones. Journal of the Belarusian State University. Ecology 2023,4,104–113.
7. Urošević J, Stanković D, Jovanović D, Trivan G, Rodzkin A, Jović Đ, Jovanović F. Phytoremediation Potential of Different Genotypes of *Salix alba* and *S. viminalis*. Plants. 2024; 13(5):735.

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ МЕЖЛИНОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОТ МАССЫ ТЕЛА У МРАМОРНОГО РАКА *PROCAMBARUS VIRGINALIS*

DEPENDENCE OF THE LENGTH OF THE INTER-LARVAL INTERVAL ON THE BODY WEIGHT OF THE MARBLED CRAYFISH *PROCAMBARUS VIRGINALIS*

Е. А. Улащик, Джу Юй

E. A. Ulashchik, Zhu Yu

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
ulasikekaterina@gmail.com

*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus*

В настоящей работе описана зависимость длительности межлиночных интервалов от массы тела у речных раков, на примере мраморного рака *Procambarus virginalis*, который быстро распространяется по пресным водоемам Евразии и Африки с начала XXI столетия. Было выяснено, что длительность межлиночных интервалов возрастает с увеличением массы тела особей и сокращается с ростом температуры.

This paper describes the dependence of the duration of interfinal intervals on body weight in river crayfish using the example of the marbled crayfish *Procambarus virginalis*, which has spread rapidly in freshwaters of Eurasia and Africa since the beginning of the 21st century. It has been found that the duration of interfinal intervals increases with the body weight of the individuals and decreases with increasing temperature.