

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ИОНАМИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, С ПОМОЩЬЮ ДРЕВЕСНЫХ И КУСТАРНИКОВЫХ РАСТЕНИЙ

О.В. Фрунзе

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

o.frunze@donnu.ru

Проанализировано использование древесных и кустарниковых растений с развитой корневой системой и большой биомассой в технологии фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами. Древесные растения могут применяться в процессе фитовосстановления городских систем в качестве долгосрочных поглотителей ионов тяжелых металлов из почвы. Рассмотрены основные механизмы фиторемедиации загрязненных урбанизированных территорий с помощью древесных и кустарниковых растений. Исследована сорбционная способность ионов кобальта, марганца и хрома некоторыми видами древесных и кустарниковых растений. Изучено накопление тяжелых металлов проростками в условиях загрязнения почвы ионами кобальта, марганца и хрома. Определен фактор переноса ионов кобальта, марганца и хрома для изученных видов растений. Выявлены виды-гипераккумуляторы тяжелых металлов — *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L., которые можно использовать для фитовосстановления почв техногенного региона, загрязненных ионами кобальта, марганца и хрома. Отмечены низкие концентрации кобальта, марганца и хрома у проростков *Quercus robur* L. и *Robinia pseudoacacia* L. в надземной части, что свидетельствует об их способности исключать ионы тяжелых металлов из своих надземных частей. Установлено, что устойчивые к загрязнению почвы проростки *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L. вследствие своей превосходной приспособляемости даже на деградированной и загрязненной тяжелыми металлами почве опытного участка обладают высоким уровнем накопления биомассы без достоверных фактов угнетения ростовых процессов. Во время контролируемого процесса фиторемедиации, проводимого в полевых условиях отмечена их высокая сорбционная способность, позволяющая рекомендовать указанные виды к использованию в технологиях восстановления почв, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Ключевые слова: кобальт, марганец, хром, техногенное загрязнение, фиторемедиация, растения-гипераккумуляторы, сорбционная способность

Ссылка для цитирования: Фрунзе О.В. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 6. С. 92–98. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98

Основным источником загрязнения почвы ионами кобальта, марганца и хрома служат деятельность металлургических предприятий и другие виды антропогенной деятельности [1–4]. В индустриально развитых регионах Донбасса большинство промышленных комплексов размещены в черте городов и стали неотъемлемой частью городской среды. Вследствие высокой токсичности тяжелых металлов и их способности образовывать стойкие комплексы с органическими структурами живых систем загрязнение почв металлами стало одной из наиболее серьезных экологических проблем в регионе [5]. Ионы тяжелых металлов из почвы могут попадать в трофические цепи и оказывать значительное негативное влияние на здоровье человека [6–9].

Предложенная Крамером в 2008 г., технология фиторемедиации представляет собой перспективный экологически чистый способ восстановления почвы с использованием растений [1, 10–13]. Тем не менее, большинство растений обладает

чувствительностью к чрезмерным концентрациям тяжелых металлов в почве. В природе немногие растения проявляют толерантность к тяжелым металлам или имеют способность к их аккумуляции (гипераккумуляторы), т. е. могут произрастать в загрязненных тяжелыми металлами почвах. Большинство из них — это травянистые виды с небольшой биомассой [11]. Древесные и кустарниковые растения с развитой корневой системой и большой биомассой вызывают особый интерес для технологии фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами [5, 13]. Древесные растения могут применяться в процессе фитовосстановления городских систем в качестве долгосрочных поглотителей ионов тяжелых металлов из почвы.

Цель работы

Цель работы — исследование сорбционной способности ионов кобальта, марганца и хрома некоторыми видами древесных и кустарниковых растений, применяющихся для озеленения урбанизированных территорий Донбасса для выявления видов-гипераккумуляторов ионов тяжелых металлов.

Материалы и методы

Объектами исследования для проведения эксперимента были выбраны проростки *Gleditsia triacanthos* L., *Quercus robur* L., *Caragana arboréscens* L. и *Robinia pseudoacacia* L.

В качестве загрязнителей использовались сульфат кобальта, сульфат марганца и сульфат хрома (II) по стехиометрическому отношению. Концентрации составляли: марганца — 0...3 г/кг, кобальта — 0...10 мг/кг, хрома — 0...6 мг/кг. Семена растений проращивали согласно их биологическим особенностям. Выращивание вели на протяжении 30 сут при продолжительности светового дня 14 ч и температуре окружающей среды +20...22 °С, влажности почвы около 70 %. В каждый сосуд было внесено по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм, в которую предварительно ввели сульфат кобальта, сульфат марганца и сульфат хрома.

Содержание марганца, кобальта и хрома в растительном материале определяли по методу атомно-адсорбционной спектроскопии по В. Прайсу на атомно-адсорбционном спектрофотометре Сатурн-3. Метод основан на кислотном вскрытии растительного сырья, распылении полученных растворов в пламя ацетилен — воздух или введении в графитовую печь спектрофотометра полученного раствора с последующей электротермической атомизацией [14].

Полевой эксперимент проводили в зоне влияния металлургического завода ТЗНТС г. Тореза Донецкой обл. Параметры почвы и концентрацию ионов кобальта, марганца и хрома в почве, сухой биомассе древесных растений определяли в течение четырех вегетационных периодов.

Проведенные исследования показали, что на деградированной территории преобладают малогумусные черноземы, характеризующиеся низкой влажностью и низким значением рН. Этот тип почвы имеет плохо сформированный профиль, отличается высокой проницаемостью и очень низким содержанием гумуса. Почвы также бедны питательными веществами и характеризуются низкой сорбционной способностью и малой емкостью буфера. Загрязнение района исследований — это результат воздействия выбросов металлургического завода в виде твердых частиц и, как следствие, накопление тяжелых металлов — кобальта, марганца и хрома (табл. 1).

Полевой эксперимент. Полевой эксперимент проведен на расстоянии 900 м к северо-востоку от металлургического завода на участке площадью 40 м² (участок № 1). Напротив, участок № 2 площадью 40 м² был использован в качестве контроля с условно незагрязненной почвой относительно

Т а б л и ц а 1

Характеристика почвы

Soil parametres

Параметр	Среднее значение (M) ± погрешность (m)
Влажность, %	17,96 ± 1,32
рН в Н ₂ О	5,15...5,25
рН в 1М КСl	4,64...4,79
Содержание гуминовых кислот, %	0,89 ± 0,01
Углерод (С), всего, г/кг	11,38 ± 1,12
Азот (N), мг/кг	675,00 ± 15,12
Фосфор (P), доступно, мг/кг	23,96 ± 0,78
Фосфор (P), всего, мг/кг	75,33 ± 5,22
Кобальт (Co), мг/кг	14,47 ± 0,27
Марганец (Mn), г/кг	5,740 ± 2,00
Хром (Cr), мг/кг	10,25 ± 0,12

участка № 1. Участок № 2 разместили на территории Донецкого ботанического сада. На участках № 1 и № 2 в апреле первого вегетационного года высадили 30-дневные саженцы древесных растений, осенью отобрали образцы почвы и растительного материала. В отобранных образцах определяли содержание ионов кобальта, марганца и хрома.

Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специально разработанных программ.

Результаты и обсуждение

Анализ показал высокий уровень содержания ионов кобальта в почве участка № 1, превышающий предельно допустимую концентрацию (ПДК) данного металла в несколько раз (табл. 2).

В ходе полевого эксперимента выявлены достоверные изменения концентрации кобальта в почве участка № 1 в течение всех четырех вегетационных периодов высадки растений, которые зависели как от видовой специфики растений, так и от природы металла.

Так, при выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L. на 2-й вегетационный период наблюдалось достоверное снижение в почве участка № 1 содержания ионов кобальта на 4,5...15,5 %. В конце 3-го вегетационного периода концентрация кобальта уменьшилась на 10,5...17 %, по сравнению с данными начала опыта. На 4-й вегетационный период концентрация в почве ионов кобальта снизилась на 19,5...20 %. На участке № 2 также было отмечено достоверное снижение концентрации ионов кобальта при высадке проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L., что свидетельствует об их высокой фиторемедиационной способности.

Изменение концентрации ионов кобальта, марганца и хрома в почве, подверженной фиторемедиации с помощью древесных растений
Changes in the concentration of cobalt, manganese and chromium ions in soil subjected to phytoremediation by woody plants

Веgetационный период	Содержание в почве ионов кобальта, мг/кг		Содержание в почве ионов марганца, г/кг		Содержание в почве ионов хрома, мг/кг	
	Контроль $M \pm m$	Эксперимент $M \pm m$	Контроль $M \pm m$	Эксперимент $M \pm m$	Контроль $M \pm m$	Эксперимент $M \pm m$
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.						
1	4,56 ± 0,11	15,37 ± 0,11	1,15 ± 0,05	6,33 ± 0,10	2,48 ± 0,03	10,32 ± 0,31
2	3,65 ± 0,11	13,22 ± 0,18	1,32 ± 0,04	4,62 ± 0,11	2,25 ± 0,03	8,89 ± 0,21
3	3,01 ± 0,10	12,45 ± 0,11	0,55 ± 0,01	4,32 ± 0,10	1,76 ± 0,03	7,25 ± 0,25
4	2,89 ± 0,08	12,01 ± 0,15	0,65 ± 0,01	2,89 ± 0,05	1,15 ± 0,03	6,48 ± 0,25
<i>Caragána arboréscens</i> L.						
1	4,56 ± 0,11	15,37 ± 0,11	1,15 ± 0,05	6,33 ± 0,10	2,48 ± 0,03	10,32 ± 0,31
2	3,55 ± 0,11	13,11 ± 0,25	1,22 ± 0,03	5,32 ± 0,11	2,35 ± 0,01	8,05 ± 0,11
3	3,15 ± 0,09	12,45 ± 0,23	0,75 ± 0,01	4,87 ± 0,10	1,86 ± 0,01	8,15 ± 0,11
4	2,75 ± 0,11	11,66 ± 0,23	0,78 ± 0,01	3,89 ± 0,10	1,15 ± 0,01	7,35 ± 0,11
<i>Quercus robur</i> L.						
1	4,56 ± 0,11	15,37 ± 0,11	1,15 ± 0,05	6,33 ± 0,10	2,48 ± 0,03	10,32 ± 0,31
2	4,15 ± 0,10	13,35 ± 0,20	1,22 ± 0,07	5,78 ± 0,10	2,32 ± 0,01	9,45 ± 0,25
3	3,75 ± 0,10	14,00 ± 0,20	1,20 ± 0,06	4,65 ± 0,10	2,11 ± 0,01	9,15 ± 0,20
4	3,11 ± 0,08	14,00 ± 0,18	1,00 ± 0,05	4,55 ± 0,10	2,00 ± 0,01	9,08 ± 0,20
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.						
1	4,56 ± 0,11	15,37 ± 0,11	1,15 ± 0,05	6,33 ± 0,10	2,48 ± 0,03	10,32 ± 0,31
2	4,15 ± 0,11	14,65 ± 0,25	1,30 ± 0,05	5,79 ± 0,10	2,65 ± 0,03	10,11 ± 0,25
3	4,21 ± 0,11	14,55 ± 0,25	1,32 ± 0,05	5,75 ± 0,10	2,55 ± 0,03	10,10 ± 0,20
4	4,20 ± 0,11	14,39 ± 0,24	1,33 ± 0,05	5,75 ± 0,10	2,54 ± 0,03	10,08 ± 0,20

При выращивании на участке № 1 толерантных к загрязнению проростков *Quercus robur* L. во 2-й вегетационный период зафиксировано снижение содержания ионов кобальта на 1...7,5 %. На 3-й вегетационный период концентрация снизилась на 6,0...8,5 %, на 4-й — на 9,5...11,0 % по сравнению с данными 1-го вегетационного периода. На участке № 2 также наблюдалось снижение концентрации кобальта на 3...10 %.

Иная тенденция замечена на участке № 1 у чувствительных к загрязнению почвы проростков *Robinia pseudoacacia* L. Во 2-й вегетационный период концентрация ионов кобальта в почве практически не изменилась. На 3-й и 4-й вегетационный период было некоторое снижение, однако изменения статистически не достоверны. Аналогичные данные получены и при выращивании рассматриваемых растений на участке № 2.

Анализ почвы участка № 1 показал высокий уровень содержания ионов марганца, превышающий ПДК данного металла в несколько раз. На этом участке были получены следующие результаты. Так, при выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragána arboréscens* L. на 2-й вегетационный период зафиксировано достоверное снижение

содержания ионов марганца в почве участка № 1 — на 14,5...22,5 %. Высокие показатели снижения концентрации марганца в почве могут быть обусловлены тем, что этот элемент необходим для биохимических процессов растений (является незаменимым элементом фотосистемы II), следовательно, поглощается проростками в большом количестве. В конце 3-го вегетационного периода концентрация ионов марганца в почве уменьшилась на 30,5...40 % по сравнению с началом опыта, на 4-й она снизилась на 45,5...60,0 %. На участке № 2 также было отмечено достоверное снижение содержания ионов кобальта при выращивании проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragána arboréscens* L. — на 10...50 %.

При выращивании на участке № 1 толерантных к загрязнению проростков *Quercus robur* L. на 2-й вегетационный период было установлено незначительное снижение содержания ионов марганца — на 3,4...5,5 %, на 3-й — их концентрация снизилась на 6,5...7,5 %, а на 4-й — на 11,5 % по сравнению с данными по 1-му вегетационному периоду. На участке № 2 концентрация ионов марганца также снизилась.

При выращивании на участке № 1 чувствительных к загрязнению почвы проростков *Robinia*

pseudoacacia L. во 2-й, 3-й и 4-й вегетационный периоды практически не было изменений концентрации ионов марганца в почве, как и при выращивании данных растений на участке № 2.

Анализ почвы участка № 1 на содержание тяжелых металлов показал его высокий уровень по хрому, превышающий ПДК данного металла практически в 3,5 раза. Во время контролируемого процесса фиторемедиации, проводимого в полевых условиях, были получены следующие результаты. При выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L. на 2-й вегетационный период наблюдалось достоверное снижение содержания в почве участка № 1 ионов хрома — на 6,5...9,5 %. В конце 3-го вегетационного периода концентрация ионов хрома в почве уменьшилась на 12,5...25 % по сравнению с началом опыта. На 4-й вегетационный период концентрация в почве ионов хрома снизилась на 42,4...48,5 %. На участке № 2 также было отмечено достоверное снижение содержания ионов хрома при выращивании проростков *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L.

Исследования показали высокое накопление ионов кобальта, марганца и хрома в корнях всех изучаемых видов древесных растений, особенно в условиях высокой концентрации тяжелых металлов в почве.

Так, у устойчивого вида *Gleditsia triacanthos* L., обладающего высокой аккумулярующей способностью, было отмечено увеличение концентрации ионов кобальта, марганца и хрома в корнях — на 10...50 % в течение четырех вегетационных периодов, причем количество кобальта в корневой системе практически в 2,5 раза было больше по сравнению с его надземной частью (рис. 1–3). Это обусловлено высокой степенью связывания ионов металла компартментами корневой системы при транспортировке тяжелых металлов от корней к побегам, что можно расценивать как механизм приспособления растений к полиметаллическому стрессу.

У проростков *Caragana arboréscens* L. также прослеживалась тенденция к большему накоплению ионов тяжелых металлов в корневой системе растений.

У проростков *Quercus robur* L. и *Robinia pseudoacacia* L. в надземной части определена низкая концентрация и кобальта, и марганца, и хрома, что говорит о способности данных видов растений к исключению ионов тяжелых металлов из надземной части. Аналогичные результаты были также отмечены многими исследователями у таких древесных видов, как *Salix* для свинца, цинка, меди, алюминия [4, 10, 15], *Fraxinus* для цинка, кадмия и меди [16, 17] и *Eucalyptus* для свинца, кадмия и меди [18].

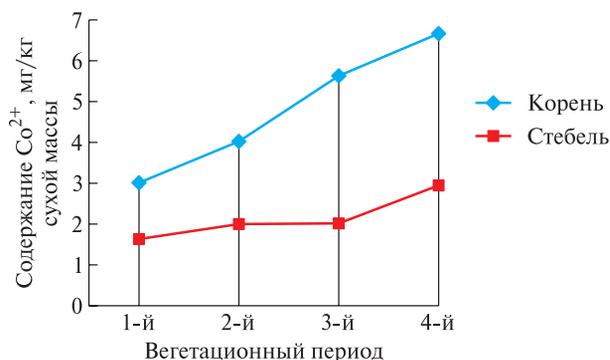


Рис 1. Накопление ионов Co^{2+} вегетативными органами *Gleditsia triacanthos* L.

Fig. 1. Accumulation of Co^{2+} ions by *Gleditsia triacanthos* L. vegetative organs

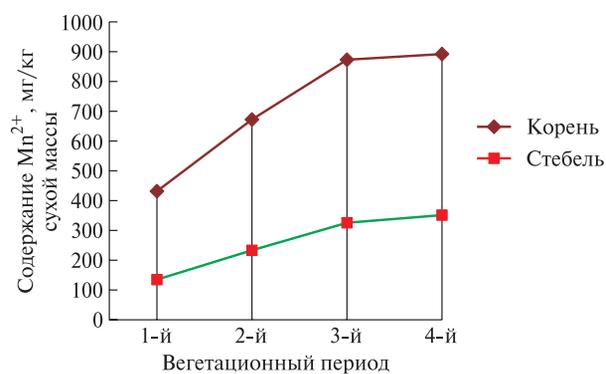


Рис 2. Накопление ионов Mn^{2+} вегетативными органами *Caragana arboréscens* L.

Fig. 2. Accumulation of Mn^{2+} ions by *Caragana arboréscens* L. vegetative organs

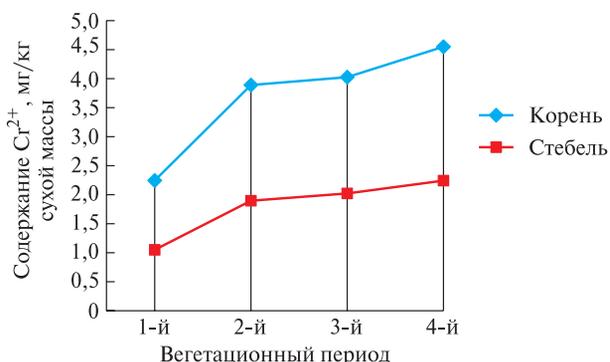


Рис 3. Накопление ионов Cr^{2+} вегетативными органами *Quercus robur* L.

Fig. 3. Accumulation of Cr^{2+} ions by *Quercus robur* L. vegetative organs

Накопление ионов тяжелых металлов и их исключение являются двумя основными стратегиями, благодаря которым растения реагируют на повышенные концентрации ионов в вегетативных органах [2]. Фактор транслокации ($C_{\text{побег}}/C_{\text{корень}}$) > 1 распространен у видов растений металл-аккумуляторов, тогда как фактор транслокации < 1 у видов растений-исключателей металлов [2, 11, 19]. Сафонов А.И. [20] показал, что у большинства

видов растений, произрастающих на отвалах металлургических предприятий, наблюдается сниженная транслокация металлов в надземные органы. Hancock и др. [17] также отметили *Alnus incana* как исключителя ионов тяжелых металлов. У этого вида развит механизм предотвращения поглощения ионов металлов в надземные органы путем их стабилизации в ризосфере или удержания в корнях.

Фиторемедиация с помощью механизмов фитоэкстракции и фитостабилизации является перспективной технологией извлечения ионов тяжелых металлов из почв городской среды [8]. Гипераккумуляторы ионов тяжелых металлов, которые способны их поглощать и транспортировать из почвы в побеги, считаются наиболее перспективными для технологии фиторемедиации. К сожалению, большинство растений в природе чувствительны к чрезмерному содержанию тяжелых металлов в почве. Более того, медленный рост и небольшая биомасса многих гипераккумуляторов тяжелых металлов ограничивают их применение для восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами [11]. При фитостабилизации ионы тяжелых металлов абсорбируются и удерживаются корнями и ризосферой, тем самым подавляя подвижность этих ионов, ограничивая их вымывание в грунтовые воды и снижая биодоступность для транслокации в пищевую цепь [11, 22–25].

Древесные растения, особенно быстрорастущие виды с большим объемом биомассы, вызывают широкий интерес для применения в фитостабилизации [12, 14, 25]. Нами установлена относительно высокая способность вида *A. Nepalensis* накапливать цинк, свинец и кадмий в корнях при выращивании на пяти участках с интенсивно загрязненными почвами и значительное накопление кадмия в побегах при выращивании на умеренно загрязненных почвах. Это указывает на возможность его применения в фиторемедиации горных районов [18, 19, 26].

Выводы

Устойчивые к загрязнению почвы проростки видов *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L. вследствие своей превосходной приспособляемости даже на деградированной и загрязненной ионами тяжелых металлов, почве участка № 1 показали высокий уровень накопления биомассы без достоверных фактов угнетения ростовых процессов. Контролируемый процесс фиторемедиации, проводимый в полевых условиях, обнаружил высокую сорбционную способность этих видов, что дает возможность рекомендовать их к использованию в технологии восстановления почв, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Список литературы

- [1] Glick B.R. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment // *Biotechnology Advances*, 2010, v. 21, no. 5, pp. 383–393.
- [2] Kang D.-H., Tsao D., Wang-Cahill F., Rock S., Schwab A.P., Banks M.K. Assessment of Landfill Leachate Volume and Concentration of Cyanide and Fluoride during Phytoremediation // *Bioremediation J.*, 2012., v. 12, no. 1, pp. 32–45.
- [3] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soil and plants. CRC Press LLC, 2001, 413 p.
- [4] Meena M.K. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study // *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, v. 192, no. 12, p. 785.
- [5] Yu H., Huang J., Ji C., Li Z. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China // *Land*, 2021, v. 10, no. 4, p. 344.
- [6] Junior A.M.D., Oliva M.A., Ferreira F.A. Dispersal pattern of airborne emissions from an aluminium smelter in Ouro Preto, Brasil, as expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species // *Ecological Indicators*, 2012, v. 8, no. 5, pp. 454–461.
- [7] Pilon-Smits E., Pilon M. Phytoremediation of Metals Using Transgenic Plants // *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, v. 21, no. 5, pp. 439–456.
- [8] Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China // *J. of China Coal Society*, 2020, v. 45, pp. 338–350.
- [9] Pashentsev D.A., Abramova A.I., Eriashvili N.D., Grimal'skaya S.A., Gafurova A.Ya., Kharisova G.M., Karpenko G.V., Avilova V.V. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring // *Ekoloji*, 2019, v. 28 (107), pp. 243–251.
- [10] Wang S., Huang J., Yu H., Ji C. Recognition of landscape key areas in a coal mine area of a semi-arid steppe in China: a case study of Yimin open-pit coal mine // *Sustainability*, 2020, v. 12, p. 2239.
- [11] Zhao A., Yu Q., Feng L., Zhang A., Pei T. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau // *J. of Environmental Management*, 2020, v. 261, p. 110214.
- [12] Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // *BIO Web Conf.*, 2021, v. 31, no. 00020, 4 p.
- [13] Kramer U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils // *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, v. 16, no. 2, pp. 133–141.
- [14] Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Л.: Химия, 1983. 144 с.
- [15] Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell'Oca A., Meers E., Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment // *Ecological Indicators*, 2021, v. 125, p. 107508.
- [16] Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems // *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, v. 44, no. 127, p. 385.
- [17] Hancock G.R., Martin Duque J.F., Willgoose G.R. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands // *Ecological Engineering*, 2020, v. 155, p. 105836.
- [18] Neamtu R., Sluser B., Plavan O., Teodosiu C. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution // *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, v. 193, no. 340, p. 09110.

- [19] Zhang M., Wang J., Li S., Feng D., Cao E. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach // *Catena*, 2020, v. 194, p. 104738.
- [20] Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region // *BIO Web Conf.*, 2022, v. 43, no. 03002, 8 p.
- [21] An Y., Liu S., Sun Y., Shi F., Beazley R. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory // *Landscape Ecology*, 2021, v. 36, pp. 2059–2076.
- [22] Yeprintsev S.A., Shekoyan S.V., Lepeshkina L.A., Voronin A.A., Klevtsova M.A. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 582(1), p. 012012.
- [23] Safonov A.I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*, 2013, no. 1, pp. 52–59.
- [24] Safonov A.I. Phytoindicational monitoring in Donetsk // *World Ecology J.*, 2016, v. 6, no. 4, pp. 59–71.
- [25] Zhang P., Ye Q., Yu Y. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation // *Global Ecology and Conservation*, 2021, v. 32, p. 1934.
- [26] Xu W., Wang J., Zhang M., Li S. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area // *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 286, p. 125523.

Сведения об авторе

Фрунзе Оксана Валентиновна — канд. техн. наук, доцент, Донецкий национальный университет, o.frunze@donnu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2022.

Одобрено после рецензирования 20.09.2022.

Принята к публикации 07.10.2022.

WOODY AND SHRUB PLANT PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METAL IONS

O.V. Frunze

Donetsk National University, 24, Universitetskaya st., 83000, Donetsk

o.frunze@donnu.ru

The use of woody and shrubby plants with a developed root system and a large biomass in the technology of phytoremediation of soils contaminated with heavy metals is analyzed. Woody plants can be used in the process of phyto-recovery of urban systems as long-term absorbers of heavy metal ions from the soil. The main mechanisms of phytoremediation of contaminated urban areas with the help of trees and shrubs are considered. The sorption capacity of cobalt, manganese and chromium ions by some species of woody and shrubby plants has been studied. The accumulation of heavy metals by seedlings under conditions of soil contamination with cobalt, manganese and chromium ions was studied. The transfer factor of cobalt, manganese and chromium ions was determined for the studied plant species. Species-hyperaccumulators of heavy metals, *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L., have been identified, which can be used for phyto-restoration of soils of the technogenic region contaminated with cobalt, manganese and chromium ions. Low concentrations of cobalt, manganese and chromium were noted in the seedlings of *Quercus robur* L. and *Robinia pseudoacacia* L. in the aerial part, which indicates their ability to exclude heavy metal ions from their aerial parts. It has been established that seedlings of *Gleditsia triacanthos* L., *Caragana arboréscens* L., resistant to soil pollution, due to their excellent adaptability, even on degraded and contaminated with heavy metals soil of the experimental plot, have a high level of biomass accumulation without reliable facts of inhibition of growth processes. During the controlled process of phytoremediation carried out in the field, their high sorption capacity was noted, which makes it possible to recommend these species for use in technologies for the restoration of soils contaminated with heavy metal ions.

Keywords: cobalt, manganese, chromium, technogenic pollution, phytoremediation, hyperaccumulator plants, sorption capacity

Suggested citation: Frunze O.V. *Fitoremediatsiya pochv, zagryaznennykh ionami tyazhelykh metallov, s pomoshch'yu drevesnykh i kustarnikovykh rasteniy* [Woody and shrub plant phytoremediation of soils contaminated with heavy metal ions]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 92–98.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98

References

- [1] Glick B.R. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnology Advances*, 2010, v. 21, no. 5, pp. 383–393.
- [2] Kang D.-H., Tsao D., Wang-Cahill F., Rock S., Schwab A.P., Banks M.K. Assessment of Landfill Leachate Volume and Concentration of Cyanide and Fluoride during Phytoremediation. *Bioremediation J.*, 2012., v. 12, no. 1, pp. 32–45.
- [3] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soil and plants. CRC Press LLC, 2001, 413 p.
- [4] Meena M.K. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, v. 192, no. 12, p. 785.

- [5] Yu H., Huang J., Ji C., Li Z. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China. *Land*, 2021, v. 10, no. 4, p. 344.
- [6] Junior A.M.D., Oliva M.A., Ferreira F.A. Dispersal pattern of airborne emissions from an aluminium smelter in Ouro Preto, Brasil, as expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species. *Ecological Indicators*, 2012, v. 8, no. 5, pp. 454–461.
- [7] Pilon-Smits E., Pilon M. Phytoremediation of Metals Using Transgenic Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, v. 21, no. 5, pp. 439–456.
- [8] Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China. *J. of China Coal Society*, 2020, v. 45, pp. 338–350.
- [9] Pashentsev D.A., Abramova A.I., Eriashvili N.D., Grimalskaya S.A., Gafurova A.Ya., Kharisova G.M., Karpenko G.V., Avilova V.V. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring. *Ekoloji*, 2019, v. 28 (107), pp. 243–251.
- [10] Wang S., Huang J., Yu H., Ji C. Recognition of landscape key areas in a coal mine area of a semi-arid steppe in China: a case study of Yimin open-pit coal mine. *Sustainability*, 2020, v. 12, p. 2239.
- [11] Zhao A., Yu Q., Feng L., Zhang A., Pei T. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau. *J. of Environmental Management*, 2020, v. 261, p. 110214.
- [12] Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis. *BIO Web Conf.*, 2021, v. 31, no. 00020, 4 p.
- [13] Kramer U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, v. 16, no. 2, pp. 133–141.
- [14] Khavezov I., Tsalev D. *Atomno-absorbtsionnyi analiz* [Atomic absorption analysis]. Leningrad: Khimiya [Chemistry], 1983, 144 p.
- [15] Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell’Oca A., Meers E., Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators*, 2021, v. 125, p. 107508.
- [16] Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, v. 44, no. 127, p. 385.
- [17] Hancock G.R., Martin Duque J.F., Willgoose G.R. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands. *Ecological Engineering*, 2020, v. 155, p. 105836.
- [18] Neamtu R., Sluser B., Plavan O., Teodosiu C. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, v. 193, no. 340, p. 09110.
- [19] Zhang M., Wang J., Li S., Feng D., Cao E. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach. *Catena*, 2020, v. 194, p. 104738.
- [20] Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region. *BIO Web Conf.*, 2022, v. 43, no. 03002, 8 p.
- [21] An Y., Liu S., Sun Y., Shi F., Beazley R. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory. *Landscape Ecology*, 2021, v. 36, pp. 2059–2076.
- [22] Yeprintsev S.A., Shekoyan S.V., Lepeshkina L.A., Voronin A.A., Klevtsova M.A. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 582(1), p. 012012.
- [23] Safonov A.I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region. *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*, 2013, no. 1, pp. 52–59.
- [24] Safonov A.I. Phytointercational monitoring in Donetsk. *World Ecology J.*, 2016, v. 6, no. 4, pp. 59–71.
- [25] Zhang P., Ye Q., Yu Y. Research on farmers’ satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation. *Global Ecology and Conservation*, 2021, v. 32, p. 1934.
- [26] Xu W., Wang J., Zhang M., Li S. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area. *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 286, p. 125523.

Author’s information

Frunze Oksana Valentinovna — Cand. Sci. (Technology), Associate Professor, Head of Plant Physiology the Department, Donetsk National University, o.frunze@donnu.ru

Received 10.06.2022.

Approved after review 20.09.2022.

Accepted for publication 07.10.2022.