

Научная статья

УДК 574.24:633.853.483

DOI: 10.32516/2303-9922.2023.48.5

Оценка фиторемедиационного потенциала горчицы в условиях загрязнения почвы Zn, Pb, Ni

Ирина Сергеевна Коротченко¹, Виктория Андреевна Медведева²

^{1,2} Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹ kisaspi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9099-9537>

² medvedeva_victoriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5423-016X>

Аннотация. В статье показана целесообразность использования горчицы белой (*Sinapis alba* L.) сорта Семеновская в качестве растения-фиторемедианта для детоксикации почв от тяжелых металлов. В процессе работы проанализировано изменение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов (цинка, никеля и свинца) в почве до и после посева горчицы в модельно-полевом опыте на биополигоне Красноярского государственного аграрного университета (г. Красноярск, Красноярский край) в 2020 и 2021 гг. Установлено, что произошло статистически значимое ($p < 0,05$) уменьшение валового содержания и подвижных форм свинца, цинка и никеля в почве в конце вегетационных периодов 2020 и 2021 гг. при выращивании горчицы белой сорта Семеновская. Таким образом, фиторемедиация с помощью горчицы белой сорта Семеновская может быть использована на почвах, загрязненных ионами свинца, цинка и никеля в дозе до 10 ПДК (ОДК), так как за один вегетационный период происходит снижение концентрации подвижных форм свинца, цинка и никеля максимум в 2 раза, валового содержания — в 7 раз.

Ключевые слова: загрязнение, тяжелые металлы, фиторемедиация, *Sinapis alba* L., детоксикация.

Для цитирования: Коротченко И. С., Медведева В. А. Оценка фиторемедиационного потенциала горчицы в условиях загрязнения почвы Zn, Pb, Ni // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2023. № 4 (48). С. 78—86. URL: http://vestospu.ru/archive/2023/articles/5_48_2023.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2023.48.5.

Original article

Evaluation of the phyto-remediation potential of *Sinapis alba* L. under conditions of Zn, Pb, Ni soil contamination

Irina S. Korotchenko¹, Victoria A. Medvedeva²

^{1,2} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹ kisaspi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9099-9537>

² medvedeva_victoriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5423-016X>

Abstract. The article shows the expediency of using *Sinapis alba* L. of Semenovskaya variety as a phytoremediant plant for detoxification of soils from heavy metals. The study analyzed the changes in the content of gross and mobile forms of heavy metals (zinc, nickel and lead) in the soil before and after sowing sinapis as a model field experiment at the biopolygon of the Krasnoyarsk State Agrarian University (Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Krai) in 2020 and 2021. It was found that there was a statistically significant ($p < 0.05$) decrease in the concentration of mobile and gross forms of lead, zinc and nickel in the soil at the end of the growing seasons of 2020 and 2021 when growing *Sinapis alba* L. of Semenovskaya variety. Thus, phytoremediation using *Sinapis alba* of Semenovskaya variety can be used on soils contaminated with lead, zinc and nickel ions at a dose of up to 10 MPC (APC), since during one growing season the concentration of mobile forms of lead, zinc and nickel decreases.

Keywords: pollution, heavy metals, phyto-remediation, *Sinapis alba* L., detoxification.

© Коротченко И. С., Медведева В. А., 2023

For citation: Korotchenko I. S., Medvedeva V. A. Evaluation of the phyto-remediation potential of *Sinapis alba* L. under conditions of Zn, Pb, Ni soil contamination. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2023, no. 4 (48), pp. 78—86. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2023.48.5>.

Введение

Красноярский край считается крупнейшим промышленным центром Восточной Сибири с развитой металлургией. По данным государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды, Красноярский край занимает лидирующие позиции в России по степени загрязненности атмосферного воздуха [5]. В результате загрязнения воздуха происходит изменение его состава, оказывающее негативное воздействие на условия жизни человека, на состояние флоры, фауны, водной и почвенной среды обитания [3; 11].

Приоритетные поллютанты, находящиеся в атмосферном воздухе (оксиды азота, бенз(а)пирен, диоксид серы, тяжелые металлы и многие другие), оседают в почву [14].

Исследования Т. В. Зазнобиной, О. В. Ивановой, Е. В. Алхименко [9], И. С. Коротченко [12] указывают, что в городе Красноярске, а также прилегающих к нему территориях существуют локализованные загрязнения почв тяжелыми металлами (свинец, цинк, никель).

На сегодняшний день сохраняется потенциальная угроза загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ). Основными источниками загрязнения почв ТМ в Красноярском крае являются тепловые электрические станции, автотранспорт, химическая промышленность, сельское хозяйство, металлургические предприятия. Известно, что тяжелые металлы негативно влияют на рост и развитие растений [19], а также на почвенное биоразнообразие (снижают фильтрующую способность почвы, запасы органического вещества и др.) [13].

Поступление в почву тяжелых металлов определяет вероятность дальнейшей их миграции в грунтовые воды, в растения и создает потенциально опасную угрозу для живых организмов, включая человека [20]. Почва, загрязненная ТМ, может на протяжении многих лет стать непригодной для выращивания растениеводческой продукции [13].

Для детоксикации почв разработаны различные химические, физико-химические, агротехнические методы и приемы, но приоритетным способом признается метод фиторемедиации [7]. Фиторемедиация — это метод очистки почв, воды на основе использования зеленых растений [17; 21]. На данный момент актуален поиск растений-сверхнакопителей, которые в определенных экологических условиях должны аккумулировать в своей биомассе от одного [1; 2] до нескольких металлов [7], т.е. быть гипераккумуляторами загрязняющих веществ [2]. Например, исследователями выявлены растения с высокой аккумулирующей способностью (высокий фиторемедиационный потенциал) по отношению к Pb — бархатцы (*Tagetes* L.), фацелия (*Phacelia* Juss.), горчица (*Sinapis alba* L.), злаковые травы [2], кукуруза обыкновенная (*Zea mays* L.) [16]; к Cd — ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) [16]; смеси Fe, Zn, Cu, Mn, Cd — горчица (*Sinapis alba* L.), рапс (*Brassica canola* L.) [7]; смеси Cd, Cu и Pb — фацелия (*Phacelia* Juss.), бархатцы (*Tagetes* L.), горчица (*Sinapis alba* L.), люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.), клевер (*Trifolium* L.) [8].

Фиторемедиационный потенциал растений оценивают методом биотестирования [6; 8], так как одно из требований к растениям-фиторемедиантам — интенсивность роста, большая биомасса [10], а также через анализ содержания ТМ в почве, биомассе растений.

Целью данной работы являлась оценка применения горчицы белой (*Sinapis alba* L.) в технологии фиторемедиации при загрязнении почв цинком, никелем и свинцом.

Задачи исследования:

- проанализировать изменение валового содержания и концентрации подвижных форм цинка, никеля и свинца в почве при выращивании горчицы белой;

- выявить кратность снижения содержания ТМ в почве при выращивании горчицы белой.

Материал и методы исследования

В качестве объекта исследования в работе была выбрана горчица белая сорта Семёновская.

Оценку качества влияния тяжелых металлов на растения проводили в микрополевых условиях на биополигоне Красноярского государственного аграрного университета. Исследования продолжались в течение двух вегетационных периодов (2020 и 2021 гг.).

В условиях модельного микрополевого опыта в мае 2020 г. искусственно загрязняли чернозем выщелоченный. ТМ по валовому содержанию [18] 5 ПДК (ОДК) и 10 ПДК (ОДК) вносили в опытные варианты в виде солей (нитратов). В каждый сосуд площадью 0,3 м² (сосуды без дна со свободной фильтрацией влаги) сеяли по 30 семян, эксперимент проводили в четырехкратной повторности.

Отбор почвенных образцов проводился в начале и конце вегетационного периода возделываемых растений в 2020 и 2021 гг. в слое почвы 0—20 см согласно ГОСТ Р 58595-2019 [4].

Испытуемую почву в воздушно-сухом состоянии освобождали от корневых остатков с помощью пинцета и растирали в ступке, просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. После отправляли в лабораторию на базе Научно-исследовательского испытательного центра ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», где определяли валовое содержание и подвижные формы ТМ на атомно-абсорбционном анализаторе PinAAcle 900T.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Statistica (версия 10, Statsoft) и MS Excel 97 для Windows.

Результаты и их обсуждение

В таблицах 1 и 2 показано изменение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почве после уборки биомассы горчицы в 2020 и 2021 гг.

В результате исследования выявлено, что при выращивании горчицы содержание подвижных форм свинца в почве в вариантах Pb 5 ПДК (ОДК) и 10 ПДК (ОДК) повысилось в 2,6 раза и 1,3 раза (в 2020 г.) и снизилось на 18,46% и 38,15% (в 2021 г.) по сравнению с соответствующими вариантами эксперимента (май 2020 г.).

Таблица 1

Содержание (среднее значение) подвижных форм тяжелых металлов в почве исследуемых участков, мг/кг

Вариант	Начало эксперимента (май 2020 г.)	Конец вегетации	
		сентябрь 2020 г.	сентябрь 2021 г.
Контроль (по содержанию Pb)	3,6	3,28	1,71
Pb 5 ПДК (ОДК)	2,17	5,67	1,77
Pb 10 ПДК (ОДК)	4,08	5,37	2,52
Контроль (по содержанию Zn)	3,11	4,12	1,67
Zn 5 ПДК (ОДК)	3,84	5,35	1,67
Zn 10 ПДК (ОДК)	4,08	2,97	3,15
Контроль (по содержанию Ni)	3,19	3,08	1,64
Ni 5 ПДК (ОДК)	3,81	2,83	2,17
Ni 10 ПДК (ОДК)	3,06	3,03	1,60

Примечание: здесь и далее в таблице 2 наименование ТМ соответствует варианту эксперимента (искусственно внесенному в почву ТМ).

В вариантах Zn 5 ПДК (ОДК) и 10 ПДК (ОДК) снизилось содержание цинка на 56,36% и 22,62% (в 2021 г.).

По сравнению с маем 2020 г. в вариантах Ni 5 и Ni 10 ПДК (ОДК) также произошло снижение подвижных форм никеля на 25,72% и 0,98% (сентябрь 2020 г.), на 43,03% и 47,83% (2021 г.) соответственно.

Анализ данных показал, что после уборки биомассы горчицы валовое содержание свинца в вариантах Pb 5 ПДК (ОДК) и Pb 10 ПДК (ОДК) снизилось на 41,61 и 29,94% (2020 г.) и в 2,29 и 1,8 раза (2021 г.).

При внесении в почву 10 ПДК по свинцу и 10 ПДК по никелю их валовое содержание на начало эксперимента (май 2020 г.) оказалось на 39% и 9% меньше соответственно по сравнению с внесением в почву 5 ПДК данных металлов. Возможно, это связано с неравномерным распределением металлов в почве, с факторами, способствующими более быстрому переходу металлов в подвижные формы.

В вариантах Zn 5 ПДК (ОДК) и Zn 10 ПДК (ОДК) концентрация цинка снизилась на 33,05 и 49,99% (2021 г.) по сравнению с началом эксперимента.

Валовое содержание никеля в вариантах Ni 5 ПДК (ОДК) и Ni 10 ПДК (ОДК) снизилось на 32,46 и 16,33% (сентябрь 2020 г.) и в 3,3 и 1,9 раза (2021 г.). Стоит отметить, что содержание в почве ТМ снижается и на фоновых вариантах (контроль по металлам) (табл. 2).

Таблица 2

Валовое содержание (среднее значение) тяжелых металлов в почве
исследуемых участков, мг/кг

Вариант	Начало эксперимента (май 2020 г.)	Конец вегетации	
		сентябрь 2020 г.	сентябрь 2021 г.
Контроль (по содержанию Pb)	13,79	13,64	8,83
Pb 5 ПДК	29,27	17,09	12,76
Pb 10 ПДК	17,93	12,56	9,73
Контроль (по содержанию Zn)	17,45	10,49	12,31
Zn 5 ПДК	14,19	15,06	9,50
Zn 10 ПДК	20,37	14,11	10,19
Контроль (по содержанию Ni)	19,43	13,98	7,16
Ni 5 ПДК	21,07	14,23	6,37
Ni 10 ПДК	19,16	16,03	9,81

Поскольку в некоторых вариантах исследования отмечено высокое варьирование показателей концентрации тяжелых металлов, нами была проведена статистическая обработка данных для выявления влияния выращивания горчицы на валовое содержание и концентрацию подвижных форм каждого из металлов в почве (черноземе выщелоченном).

В таблице 3 показано сравнение концентрации ТМ в почве до и после посева горчицы с помощью парного двухвыборочного t-теста.

Статистический анализ данных за два года показал, что после уборки биомассы горчицы произошло статистически значимое ($p < 0,001$) снижение содержания в почве ТМ (свинца, цинка и никеля). Использование горчицы в качестве фиторемедианта оказалось эффективным по отношению к монометаллическим загрязнениям почвы солями свинца, цинка и никеля.

Связь между исследованными показателями изучали с помощью корреляционного анализа. Высокая положительная корреляционная связь между валовым содержанием и

концентрацией подвижных форм ТМ ($r = 0,78$) в 2020 г. обнаружена только для цинка после уборки биомассы горчицы. В 2021 г. между валовым содержанием и подвижными формами ТМ выявлена отрицательная корреляционная связь ($r = -0,73$) только для никеля до посева горчицы. Во всех других вариантах исследования валовое содержание и концентрация подвижных форм ТМ в почве — это независимые показатели.

Таблица 3

Сравнение содержания ТМ в почве в начале эксперимента (май 2020 г., май 2021) и конце вегетационного периода (сентябрь 2020 г., сентябрь 2021 г.) методом парного двухвыборочного t-теста для средних

Вариант	Период исследования	P ($T \leq t$) двухстороннее
Pb подвижные формы	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,00076
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00001
Pb валовое содержание	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,04065
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00002
Zn подвижные формы	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,00042
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00021
Zn валовое содержание	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,00006
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00001
Ni подвижные формы	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,00002
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00048
Ni валовое содержание	май 2020 г. — сентябрь 2020 г.	0,00014
	май 2021 г. — сентябрь 2021 г.	0,00252

Дисперсионный анализ показал, что в 2020 г. при выращивании горчицы снизилось содержание подвижных форм (в 1,1—1,5 раза) и валовое содержание (в 5,1—5,9 раза) свинца, цинка и никеля в почве примерно одинаково по вариантам исследования, статистически значимых различий между металлами по данному показателю нет (рис. 1).

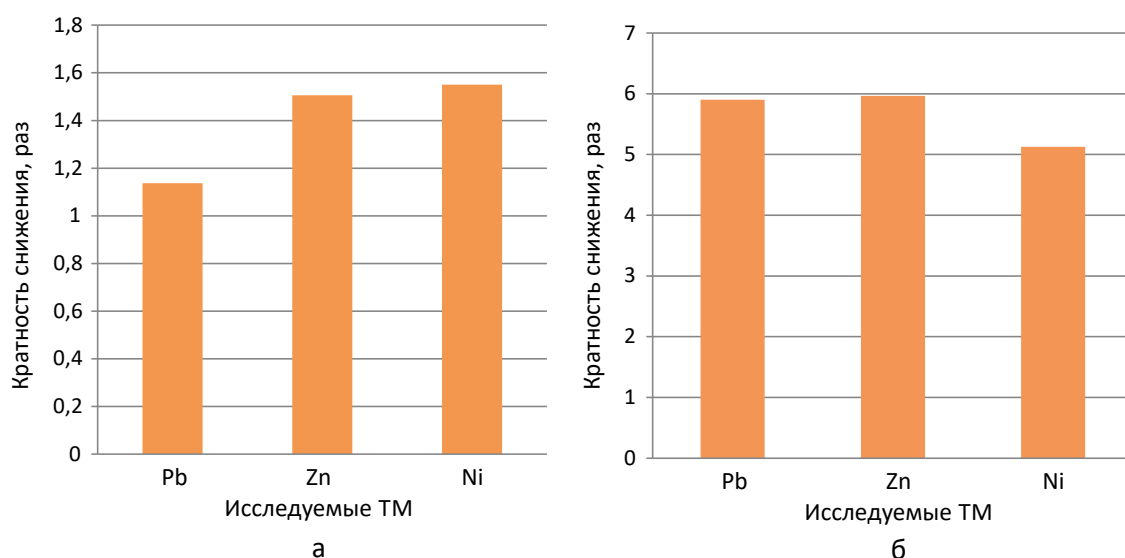


Рис. 1. Средняя кратность снижения концентрации ТМ в почве при выращивании горчицы белой: а — подвижных форм в 2020 г., б — валового содержания в 2020 г.

В 2021 г. при выращивании горчицы снизилось содержание ТМ в почве в среднем: свинца — в 4,1 раза (валовое содержание) и в 1,7 раза (подвижные формы), цинка — в

4,4 раза (валовое содержание) и в 2,1 раза (подвижные формы), никеля — в 7,3 раза (валовое содержание) и в 1,1 раза (подвижные формы). Дисперсионный анализ показал, что и для подвижных форм, и для валового содержания статистически значимых различий по критерию кратности снижения ТМ в почве за вегетационный период между вариантами нет (рис. 2).

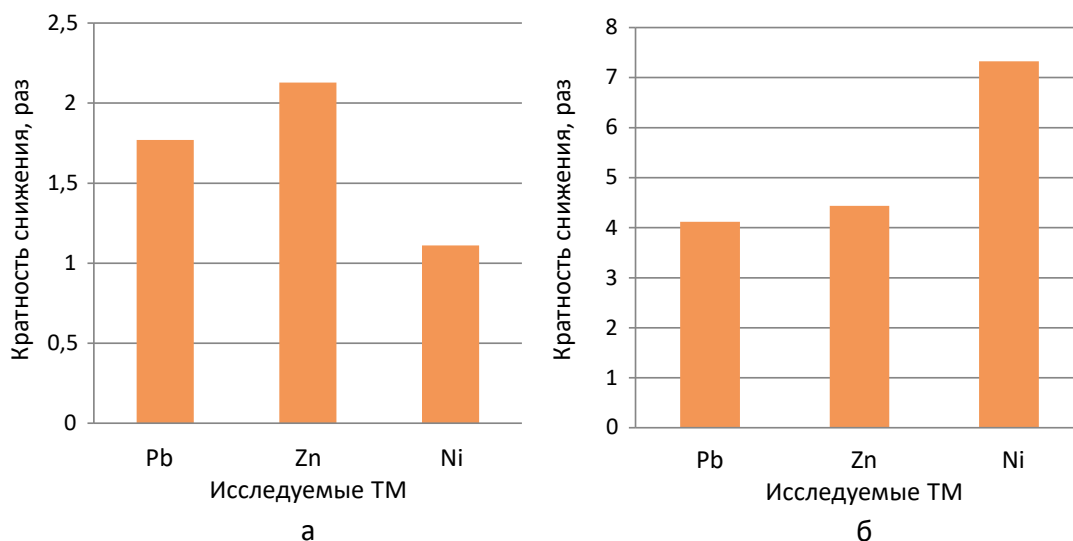


Рис. 2. Средняя кратность снижения концентрации тяжелых металлов в почве при выращивании горчицы белой: а — подвижных форм в 2021 г., б — валового содержания в 2021 г.

Уменьшение валового содержания и концентрации подвижных форм свинца, цинка и никеля в почве при выращивании горчицы белой можно объяснить высокой аккумулятивной способностью данного растения по отношению к исследуемым ТМ. Ранее в работе В. А. Медведевой [15] показано максимальное накопление никеля в надземной части растения горчицы белой.

Заключение

В условиях модельного загрязнения почвы ТМ при выращивании горчицы белой (*Sinapis alba* L.) установлено, что в 2020, 2021 гг. произошло снижение валового содержания цинка, свинца и никеля, которое имело примерно одинаковую тенденцию снижения по металлам в 2020 г., а в 2021 г. в варианте с никелем отмечено максимальное снижение по сравнению с цинком и свинцом. Концентрация подвижных форм ТМ изменялась различно по вариантам и годам. Так, концентрация подвижных форм свинца и цинка в почве в сентябре 2020 г. повысилась по сравнению со значениями концентраций в мае 2020 г., максимально — в варианте с внесением в почву свинца в дозе 5 ПДК (в 2,6 раза), но в 2021 г. отмечено снижение концентраций подвижных форм ТМ для всех вариантов исследования.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что валовое содержание и концентрация подвижных форм цинка, никеля и свинца в почве при выращивании горчицы белой (*Sinapis alba* L.) в условиях полевого опыта (Красноярский край) в целом снижается.

По среднему значению кратности снижения содержания ТМ в почве при выращивании горчицы белой можно выстроить следующий возрастающий ряд: $Pb < Zn < Ni$.

В перспективе дальнейших исследований планируем проанализировать полученные данные за 2022 г., выявить взаимосвязи содержания ТМ в почве и растениях с особенностями климатических показателей за 2020—2022 гг.

Список источников

1. Андреева И. В., Габечая В. В., Смелых О. С. Оценка эффективности применения ярового рапса в технологии индуцированной фитоэкстракции никеля в условиях загрязненной дерново-подзолистой почвы // АгроЭкоИнфо. 2022. № 4 (52). URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/4/st_417.pdf. DOI: 10.51419/202124417.
2. Витязь С. Н., Колосова М. М., Дремова М. С., Казакова М. А., Роткина Е. Б. Фиторемедиационный потенциал цветковых растений по отношению к свинцу // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10, № 1. С. 41—46.
3. Воронина О. Н., Лаврова О. П. Фиторемедиационный потенциал растительных сообществ нарушенных ландшафтов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2015. Т. 19, № 5. С. 78—82.
4. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. М. : Стандартинформ, 2019. 6 с.
5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году». URL: <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849/0/id/57481> (дата обращения: 20.04.2023).
6. Дайнеко Н. М., Матвеевков М. В. Эффективность метода биотестирования в оценке фиторемедиационного потенциала люпина узколистного // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 8-1. С. 116—118.
7. Елизарьева Е. Н., Янбаев Ю. А., Редькина Н. Н., Байков А. Г. Определение фиторемедиационного потенциала сельскохозяйственных культур на антропогенно-загрязненных почвах // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (44). С. 24—29.
8. Заболотских В. В., Васильев А. В., Танких С. Н., Карпович Е. Е. Экспериментальные исследования эффективности фиторемедиации почв, загрязненных нефтью, нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Академический вестник ЕЛПИТ. 2020. Т. 5, № 2 (12). С. 25—47.
9. Зазнобина Т. В., Иванова О. В., Алхименко Е. В. Содержание тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярска // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 2 (34). С. 59—68.
10. Киреева Н. А., Григориади А. С., Багаутдинов Ф. Я. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязненных тяжелыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 4—16.
11. Коротченко И. С. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве Красноярска // Экологические чтения-2021: XII Национальная научно-практическая конференция с международным участием. Омск : Омский гос. аграр. ун-т им. П. А. Столыпина, 2021. С. 329—332.
12. Коротченко И. С., Медведева В. А. Биодиагностика состояния почв Емельяновского района Красноярского края в условиях транспортной нагрузки // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2022. № 3 (43). С. 18—26. URL: http://vestospu.ru/archive/2022/articles/2_43_2022.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2022.43.2.
13. Кошкин Е. И., Андреева И. В., Белопухов С. Л. Оценка фиторемедиационного потенциала сортов ярового рапса (*Brassica napus* L.) в условиях загрязнения тяжелыми металлами дерново-подзолистой почвы // Агрехимия. 2014. № 8. С. 79—87.
14. Кротова Л. В., Малезик Е. Е. Загрязнение почв тяжелыми металлами в городе Брянске // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово : Западно-Сибирский научный центр, 2017. Т. 2. С. 31—33.
15. Медведева В. А. Миграция никеля в органах растений-фиторемедиантов // Инновационные тенденции развития российской науки : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Красноярск : Красноярский гос. аграр. ун-т, 2019. Ч. 1. С. 62—66.
16. Мосина Л. В., Холопов Ю. А., Жандарова Ю. А. Фитоэкстракция свинца и кадмия из почвогрунтов полигонов отходов некоторыми сельскохозяйственными культурами // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 154—161. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-1-154-161.
17. Остроумов С. А., Соломонова Е. А. Метод определения допустимых нагрузок загрязняющих веществ на высшие водные растения и перспективы его применения // Экология промышленного производства. 2012. № 2. С. 54—60.
18. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (с изменениями на 30 декабря 2022 года). Введ. 2021-28-01. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296, 2021. 1025 с. URL: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf>.
19. Сергеев А. А. Действие тяжелых металлов на биометрические показатели растений // Актуальные направления инновационного развития животноводства и современные технологии производства продук-

тов питания : материалы междунар. науч.-практ. конф. Пос. Персиановский : Донской гос. аграр. ун-т, 2020. С. 567—570.

20. Стоцкая Д. Р., Фазылов И. З., Стоцкий К. С. Загрязнение почвы тяжелыми металлами и их влияние на здоровье человека // Наука через призму времени. 2019. № 7 (28). С. 29—31.

21. Тимофеева С. С., Ульрих Д. В., Тимофеев С. С. Возможности использования фиторемедиационного потенциала и сорбционно-габионных модулей в ревитализации техногенно-нарушенных территорий Южного Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S6. С. 17—41.

References

1. Andreeva I. V., Gabechaya V. V., Smelykh O. S. Otsenka effektivnosti primeneniya yarovogo rapsa v tekhnologii indutsirovannoi fitoekstraksii nikelya v usloviyakh zagryaznennoi dernovo-podzolistoï pochvy [Evaluation of the effectiveness of the use of spring rape in the technology of induced phytoextraction of nickel in contaminated soddy-podzolic soil]. *AgroEkoInfo*, 2022, no. 4 (52). Available at: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/4/st_417.pdf. DOI: 10.51419/202124417. (In Russian)

2. Vityaz' S. N., Kolosova M. M., Dremova M. S., Kazakova M. A., Rot'kina E. B. Fitoremediatsionnyi potentsial tsvetkovykh rastenii po otnosheniyu k svintsu [Phytoremediation potential of flowering plants in relation to lead]. *Samarskii nauchnyi vestnik — Samara Journal of Science*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 41—46. (In Russian)

3. Voronina O. N., Lavrova O. P. Fitoremediatsionnyi potentsial rastitel'nykh soobshchestv narushennykh landshaftov [Phytoremediation potential of plant communities of degraded landscapes]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik — Forestry Bulletin*, 2015, vol. 19, no. 5, pp. 78—82. (In Russian)

4. GOST R 58595-2019. *Pochvy. Otbor prob* [GOST R 58595-2019. Soils. Sample selection]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 6 p. (In Russian)

5. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy v Krasnoyarskom krae v 2021 godu"* [State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2021"]. Available at: <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849/0/id/57481>. Accessed: 20.04.2023). (In Russian)

6. Daineko N. M., Matveenko M. V. Effektivnost' metoda biotestirovaniya v otsenke fitoremediatsionnogo potentsiala lyupina uzkolistnogo [Efficiency of the biotesting method in assessing the phytoremediation potential of angustifolia lupine]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2017, no. 8-1, pp. 116—118. (In Russian)

7. Elizar'eva E. N., Yanbaev Yu. A., Red'kina N. N., Baikov A. G. Opreделение fitoremediatsionnogo potentsiala sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na antropogenno-zagryaznennykh pochvakh [Determination of phytoremediation potential of agricultural crops grown on anthropogenous contaminated soils]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta — Vestnik Bashkir State Agrarian University*, 2017, no. 4 (44), pp. 24—29. (In Russian)

8. Zabolotskikh V. V., Vasil'ev A. V., Tankikh S. N., Karpovich E. E. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh nef't'yu, nef'teproduktami i tyazhelymi metallami [Experimental studies of the effectiveness of phytoremediation of soils contaminated with oil, petroleum products and heavy metals]. *Akademicheskii vestnik ELPIT — Academic bulletin ELPIT*, 2020, vol. 5, no. 2 (12), pp. 25—47. (In Russian)

9. Zaznobina T. V., Ivanova O. V., Alkhimenko E. V. Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvakh prigorodnoi zony g. Krasnoyarska [Heavy metals content in the soils of suburban areas of the city of Krasnoyarsk]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika — Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Urban development*, 2019, no. 2 (34), pp. 59—68. (In Russian)

10. Kireeva N. A., Grigoriadi A. S., Bagautdinov F. Ya. Fitoremediatsiya kak sposob ochishcheniya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami [Phytoremediation as a way to purifying soils contaminated with heavy metals]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya — Theoretical and Applied Ecology*, 2011, no. 3, pp. 4—16. (In Russian)

11. Korotchenko I. S. Soderzhanie podviznykh form tyazhelykh metallov v pochve Krasnoyarska [Content of mobile forms of heavy metals in the soil of Krasnoyarsk]. *Ekologicheskie chteniya-2021: XII Natsional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Ecological Readings-2021: XII National scientific and practical conference with International participation]. Omsk, Omskii gos. agrar. un-t im. P. A. Stolypina Publ., 2021, pp. 329—332. (In Russian)

12. Korotchenko I. S., Medvedeva V. A. Biodiagnostika sostoyaniya pochv Emel'yanovskogo raiona Krasnoyarskogo kraja v usloviyakh transportnoi nagruzki [Biodiagnostics of the soil condition in the Emelyanovo district of the Krasnoyarsk Territory under conditions of traffic load]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Elektronnyi nauchnyi zhurnal — Vestnik of Orenburg State Pedagogical University*.

Electronic Scientific Journal, 2022, no. 3 (43), pp. 18—26. Available at: http://vestospu.ru/archive/2022/articles/2_43_2022.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2022.43.2. (In Russian)

13. Koshkin E. I., Andreeva I. V., Belopukhov S. L. Otsenka fitoremediatsionnogo potentsiala sortov yarovogo rapsa (*Brassica napus* L.) v usloviyakh zagryazneniya tyazhelymi metallami dernovo-podzolistoi pochvy [Assessing the phytoremediation potential of spring rape (*Brassica napus* L.) cultivars grown on heavy metal-contaminated soddy-podzolic soil]. *Agrokhiimiya*, 2014, no. 8, pp. 79—87. (In Russian)

14. Krotova L. V., Malezhik E. E. Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami v gorode Bryanske [Soil contamination with heavy metals in the city of Bryansk]. *Nauchno-tekhnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Scientific and technical progress. Current and promising directions for the future. Proceed. of the VI Internat. sci.-pract. conf.]. Kemerovo, Zapadno-Sibirskii nauchnyi tsentr Publ., 2017, vol. 2, pp. 31—33. (In Russian)

15. Medvedeva V. A. Migratsiya nikelya v organakh rastenii-fitoremediantov [Migration of nickel in the organs of phytoremediant plants]. *Innovatsionnye tendentsii razvitiya rossiiskoi nauki: materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchennykh* [Innovative trends in the development of Russian science. Proceed. of the XII Internat. sci.-pract. conf. young scientists]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskii gos. agrar. un-t Publ., 2019, part 1, pp. 62—66. (In Russian)

16. Mosina L. V., Kholopov Yu. A., Zhandarova Yu. A. Fitoekstraktsiya svintsya i kadmiya iz pochvogruntov poligonov otkhodov nekotorymi sel'skokhozyaistvennymi kul'turami [Phytoextraction of lead and cadmium from soils of landfills by some agricultural crops]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya — Theoretical and Applied Ecology*, 2023, no. 1, pp. 154—161. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-1-154-161. (In Russian)

17. Ostroumov S. A., Solomonova E. A. Metod opredeleniya dopustimykh nagruzok zagryaznyayushchikh veshchestv na vysshie vodnye rasteniya i perspektivy ego primeneniya [Originating a method for determining the allowable loads of pollutants on aquatic higher plants and prospects of its application]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2012, no. 2, pp. 54—60. (In Russian)

18. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredi obitaniya (s izmeneniyami na 30 dekabrya 2022 goda)*. Vved. 2021-28-01. Zaregistrirvano v Minyuste Rossii 29 yanvarya 2021 g. № 62296, 2021 [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans (as amended as of Dec. 30, 2022). Enter. 2021-28-01. Registered with the Ministry of Justice of Russia on Jan. 29, 2021 No. 62296, 2021]. 1025 p. Available at: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf>. (In Russian)

19. Sergeev A. A. Deistvie tyazhelykh metallov na biometricheskie pokazateli rastenii [The effect of heavy metals on the biometric parameters of plants]. *Aktual'nye napravleniya innovatsionnogo razvitiya zhivotnovodstva i sovremennye tekhnologii proizvodstva produktov pitaniya: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Current directions of innovative development of livestock breeding and modern technologies for food production. Proceed. of the Internat. sci.-pract. conf.]. Persianovsky village, Donskoi gos. agrar. un-t Publ., 2020, pp. 567—570. (In Russian)

20. Stotskaya D. R., Fazylov I. Z., Stotskii K. S. Zagryaznenie pochvy tyazhelymi metallami i ikh vliyanie na zdorov'e cheloveka [Soil contamination with heavy metals and their impact on human health]. *Nauka cherez prizmu vremeni*, 2019, no. 7 (28), pp. 29—31. (In Russian)

21. Timofeeva S. S., Ul'rikh D. V., Timofeev S. S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya fitoremediatsionnogo potentsiala i sorbtionno-gabionnykh modulei v revitalizatsii tekhnogenno-narushennykh territorii Yuzhnogo Urala [Possibilities of using phytoremediation potential and sorption-gabion modules in the revitalization of technogenically disturbed territories of the Southern Urals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) — Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020, no. S6, pp. 17—41. (In Russian)

Информация об авторах

И. С. Коротченко — кандидат биологических наук, доцент

В. А. Медведева — аспирант

Information about the authors

I. S. Korotchenko — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

V. A. Medvedeva — Postgraduate Student

Статья поступила в редакцию 01.06.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023;
принята к публикации 20.11.2023

The article was submitted 01.06.2023; approved after reviewing 16.11.2023;
accepted for publication 20.11.2023