

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ/PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.21>

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ РАПСА И ГОРЧИЦЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ НИКЕЛЕМ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО

Научная статья

Винтоняк В.А.¹, Попова И.С.^{2,*}

¹ ORCID : 0009-0003-5423-016X;

² ORCID : 0000-0002-9099-9537;

^{1,2} Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kisaspi[at]mail.ru)

Аннотация

Статья посвящена оценке применимости рапса и горчицы в качестве фиторемедиантов для снижения концентрации никеля в черноземе выщелоченном. Для проведения исследований был заложен модельный микрополевой опыт на биополигоне Красноярского государственного аграрного университета. В почву опытных сосудов на глубину 0–20 см вносились соли никеля ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$) в концентрациях 5 ОДК и 10 ОДК. В рамках эксперимента использовались сельскохозяйственные культуры: яровой рапс (*Brassica napus*) сорта Надежный 92 и горчица белая (*Sinapis alba* L.) сорта Семеновская. Сравнение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почве до и после уборки растений горчицы и рапса с использованием парного двухвыборочного t-теста показало, что воздействие рапса и горчицы было статистически значимым. Полученные результаты подтверждают эффективность использования рапса и горчицы для очистки почв от тяжелых металлов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, никель, фитоэкстракция, чернозем, загрязнение.

EVALUATION OF RAPE AND MUSTARD APPLICABILITY FOR REDUCING NICKEL CONTAMINATION OF LEACHED BLACK SOIL

Research article

Vintonyak V.A.¹, Popova I.S.^{2,*}

¹ ORCID : 0009-0003-5423-016X;

² ORCID : 0000-0002-9099-9537;

^{1,2} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (kisaspi[at]mail.ru)

Abstract

The article is devoted to the evaluation of applicability of rape and mustard as phytoremediants to reduce nickel concentration in leached black soil. To carry out the research, a model micro-field experiment was established at the biopoligon of Krasnoyarsk State Agrarian University. Nickel salts ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$) in concentrations of 5 APC and 10 APC were applied to the soil of experimental vessels at a depth of 0–20 cm. The crops used in the experiment were spring rape (*Brassica napus*) of the Nadezhny 92 variety and white mustard (*Sinapis alba* L.) of the Semenovskaya variety. Comparison of gross content and mobile forms of heavy metals in soil before and after harvesting of mustard and rape plants using paired two-sample t-test showed that the impact of rape and mustard was statistically significant. The obtained results confirm the efficiency of rape and mustard use for soil purification from heavy metals.

Keywords: heavy metals, nickel, phytoextraction, black soil, pollution.

Введение

В современных условиях происходит очень бурное развитие промышленности, активно развивается химизации сельского хозяйства, энергетика, а также транспортные коммуникации. В связи с этим происходит загрязнение окружающей среды. К наиболее опасным загрязняющим веществам можно отнести тяжелые металлы [1], [2]. Известно, что при загрязнении почв они оказывают негативное действие на возделываемые культуры. Поэтому в настоящее время популярен поиск химических, физико-химических методов детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами. Чаще всего такие методы экономически невыгодные, а также не обеспечивают полного удаления поллютантов из почвы [3]. Ученые последние несколько десятилетий изучают технологию фиторемедиацию. Данная технология основана на восстановлении окружающей среды с помощью растений. По сравнению с другими методами она является самой бюджетной, так как не требует больших затрат, безопасна, так как не используются химические вещества [4], [5].

Фиторемедиация представляет собой многообещающий метод очистки загрязненных почв, однако она сталкивается с рядом проблем, ограничивающих её широкое применение. Основные трудности связаны с недостаточной изученностью биохимических процессов, протекающих в растениях, и отсутствием чётко разработанных технологий, адаптированных к конкретным условиям региона, типу почвы и видам токсичных веществ. В результате отсутствуют конкретные рекомендации по использованию определённых растений-гипераккумуляторов для борьбы с различными видами загрязнений. Кроме того, механизм накопления тяжёлых металлов растениями остаётся слабо изученным.

Основной задачей в методе фиторемедиация, является правильно подобранные культурные или дикие растения, которые в своей биомассе будут аккумулировать большое содержание загрязняющих веществ. Поэтому необходимо подобрать растения, исходя из следующих характеристик: у растений должен быть короткий вегетационный период, легко убираться, толерантны к высоким концентрациям токсикантов, мощная корневая система [6], [7], [8].

Целью настоящего исследования является оценка снижения концентраций никеля растениями-фиторемедиантами в черноземе выщелоченном.

Объекты и методы исследования

Для проведения исследований был заложен модельный микрополевой опыт на биополигоне Красноярского государственного аграрного университета. Почва опытного участка — чернозем выщелоченный.

В сосуды микрополевого опыта в горизонт почвы 0-20 см вносили тяжелые металлы в виде соли $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ концентрации 5 ОДК (ориентировочно-допустимая концентрация) и 10 ОДК. Площадь каждого сосуда была 0,3 м², повторность опыта четырёхкратная. В схему опыта, также были включены сельскохозяйственные культуры: яровой рапс (*Brassica napus*) сорта Надежный 92 и горчица белая (*Sinapis alba L.*) сорта Семеновская.

Определение валового содержания, подвижных форм никеля в почвенных образцах проводили на атомно-абсорбционном анализаторе PinAAcle 900T в Научно-исследовательском центре ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Основной путь поступления никеля в растения — это его поглощение корнями из почвы. После попадания никеля в почву часть его связывается с органическими веществами, делая его недоступным для растений. В связи с этим поглощение никеля растениями больше зависит не от общего содержания металла в почве, а от количества его обменной формы. Биодоступность никеля для растений повышается в следующих случаях: почвы с малым количеством гумуса, избыточное увлажнение почвы, низкий уровень pH почвенного раствора, легкий гранулометрический состав почвы.

В настоящей работе при сравнении валового содержания, подвижных форм тяжелых металлов в почве, до и после уборки растений горчицы и рапса с помощью парного двухвыборочного t-теста, выявили, что рапс и горчица повлияли — статистически значимо ($p \leq 0,05$) на снижение валового содержания и концентрацию подвижных форм в черноземе выщелоченном, причём у всех изученных вариантах с модельным загрязнением.

По результатам анализа почвы перед посевом горчицы в 2021 году было обнаружено, что валовое содержание никеля в варианте 5 ОДК увеличилось по сравнению с контрольным вариантом. У подвижных форм металла наблюдается незначительное увеличение в варианте с никелем 5 ОДК. В эксперименте с рапсом, также зафиксировано достоверное ($p \leq 0,05$) увеличение валового содержания в вариантах с никелем 5 ОДК и никелем 10 ОДК. При этом подвижные формы в варианте с никелем 10 ОДК увеличились по сравнению с контрольным вариантом.

Перед посевом растений в 2022 году было установлено, что у горчицы наблюдалось снижение подвижных форм и валового содержания никеля в почве в вариантах 5 ОДК и 10 ОДК. В эксперименте с рапсом, напротив, было зафиксировано увеличение подвижных форм металла в варианте с никелем 5 ОДК по сравнению с контролем. Также в варианте с никелем 5 ОДК отмечено увеличение его валового содержания (табл. 1).

Таблица 1 - Содержание никеля в черноземе выщелоченном перед посевом растений
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.21.1>

Вариант исследования	Исследуемые растения			
	Горчица		Рапс	
	подвижные формы, мг/кг	валовое содержание, мг/кг	подвижные формы, мг/кг	валовое содержание, мг/кг
2021 год				
Контроль (фоновое содержание Ni)	3,19±0,54	19,43±1,51	2,67±0,49	11,14±0,14
Ni 5 ПДК	3,81±0,35	21,03±1,39	2,61±0,63	13,66±0,44
Ni 10 ПДК	3,06±0,48	19,15±0,23	2,77±0,51	17,42±0,88
2022 год				
Контроль (фоновое содержание Ni)	3,08±0,81	15,91±1,91	2,70±0,21	15,27±0,67
Ni 5 ПДК	2,83±0,62	13,05±0,60	3,83±0,52	15,83±0,90
Ni 10 ПДК	3,02±0,66	13,86±1,64	4,07±0,84	14,93±0,37

Примечание: ОДК подвижных форм (Ni)=4 мг/кг, валового содержания (Ni)=80 мг/кг почвы [9]

После сбора биомассы горчицы в 2021 году было зафиксировано снижение концентраций подвижных форм никеля в черноземе выщелоченном в вариантах 5 ОДК на 1,64 мг/кг и свинца в варианте ОДК на 1,47 мг/кг соответственно. Валовое содержание никеля в варианте 5 ОДК уменьшилось на 6,8 мг/кг, а в варианте 10 ОДК — на 3,12 мг/кг по сравнению с показателями до посева. Также было отмечено снижение подвижных форм металла в варианте с рапсом: в 5 ОДК на 0,42 мг/кг и в 10 ОДК на 0,56 мг/кг; валовое содержание в варианте 10 ОДК снизились на 4,28 мг/кг по сравнению с содержанием металла до посева.

В 2022 году, после уборки биомассы горчицы, также было зафиксировано снижение концентраций подвижных форм никеля в черноземе выщелоченном: в варианте 5 ОДК на 0,86 мг/кг и в 10 ОДК на 1,07 мг/кг. Валовые формы в варианте 5 ОДК уменьшились на 6,69 мг/кг, а в 10 ОДК — на 4,05 мг/кг по сравнению с показателями до посева. В варианте с рапсом также наблюдалось снижение подвижных форм: в 5 ОДК на 1,64 мг/кг и в 10 ОДК на 1,86 мг/кг; валовое содержание в 5 ОДК снизились на 11,49 мг/кг, а в 10 ОДК — на 1,79 мг/кг по сравнению с содержанием до посева (табл. 2).

Оба растения показали высокую способность к снижению содержания никеля в почве, особенно заметную в вариантах с повышенной концентрацией загрязняющего вещества (5 и 10 ОДК). Это подтверждает целесообразность использования горчицы и рапса в программах фиторемедиации загрязненных территорий.

Таблица 2 - Содержание никеля в черноземе выщелоченном после уборки растений

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.21.2>

Вариант исследования	Исследуемые растения			
	Горчица		Рапс	
	подвижные формы, мг/кг	валовое содержание, мг/кг	подвижные формы, мг/кг	валовое содержание, мг/кг
2021 год				
Контроль(фоновое содержание Ni)	1,64±0,75	13,97±1,15	2,33±0,22	13,84±0,83
Ni 5 ПДК	2,17±0,57	14,23±0,91	2,19±0,30	14,34±0,87
Ni 10 ПДК	1,59±0,27	16,03±0,58	2,21±0,29	13,14±0,39
2022 год				
Контроль(фоновое содержание Ni)	1,67±0,43	7,16±1,72	2,33±0,23	13,84±0,83
Ni 5 ПДК	1,97±0,42	6,36±1,56	2,19±0,31	14,34±0,87
Ni 10 ПДК	1,95±0,40	9,81±1,45	2,21±0,29	13,14±0,39

Примечание: ОДК подвижных форм (Ni)=4 мг/кг, валового содержания (Ni)=80 мг/кг почвы [9]

Результаты исследования свидетельствуют о том, что эффективно использовать растения рапса и горчицы для очистки почв от тяжелых металлов. Другие исследователи также в своих работах используют декоративные растения из семейства капустных в технологии фиторемедиация [10].

Таким образом, в результате исследования вывили, что во всех вариантах в модельном микрополевом опыте после уборки растений-фиторемедиантов снизилось содержание подвижных форм и валового содержания никеля в черноземе выщелоченном.

Заключение

Полученные результаты позволяют рекомендовать данную технологию в качестве детоксикации почв, так как она направлена на снижение тяжёлых металлов в сельскохозяйственной продукции.

Выбор растений для фиторемедиации действительно зависит от множества факторов, включая тип загрязнения, состав почвы и климатические условия региона. Генетическая инженерия также играет важную роль в создании новых сортов растений, которые могут более эффективно извлекать и накапливать тяжелые металлы. Продолжение исследований в этой области поможет расширить арсенал растений-фиторемедиантов и улучшить эффективность методов очистки загрязненных почв.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Коротченко И.С. Биодиагностика состояния почв Емельяновского района Красноярского края в условиях транспортной нагрузки. / И.С. Коротченко, В.А. Медведева // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. — 2022. — 3(43). — С. 18–26.
2. Korotchenko I.S. Heavy metals content in the soil cover and woody plants of Krasnoyarsk / I.S. Korotchenko, G.G. Pervyshina, V.A. Medvedeva [et al.] // E3s web of conferences : VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023). — Iss. 390. — Krasnoyarsk : EDP Sciences, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202339004022
3. Бочарников В.С. Способ биологической очистки почвы, загрязненной тяжелыми металлами / В.С. Бочарников, М.А. Заичкина, М.А. Денисова и др. // Известия Нижневолжского агрониверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование. — 2022. — 2(66). — С. 347–353.
4. Мещерякова В.Ю. Перспективы использования различных растений с целью фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами / В.Ю. Мещерякова, Н.А. Дьякова, Ю.А. Павлова // Ульяновский медико-биологический журнал. — 2024. — 3. — С. 139–154.
5. Родькин О.И. Фиторемедиация как метод комплексного решения экологических проблем / О.И. Родькин // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. — 2024. — Т. 34, 3. — С. 284–295.
6. Дроздова И.В. Аккумуляция никеля и фиторемедиационный потенциал *Sisymbrium lipskyi* / И.В. Дроздова, И.Б. Калимова, А.И. Беляева и др. // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2024. — Т. 20, 1. — С. 182–187.
7. Бауэр В.В. Фиторемедиация как перспективный метод очистки почв от тяжелых металлов. / В.В. Бауэр, О.Ю. Сартакова, О.М. Горелова // Ползуновский вестник. — 2023. — 2. — С. 160–165.
8. Харитонов А.Э. Использование фиторемедиации для очистки почв и водоёмов от тяжёлых металлов / А.Э. Харитонов, А.Н. Федосеев // Успехи в химии и химической технологии. — 2022. — Т. 36, 2(251). — С. 39–41.
9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. — Введ. 2021-01-28. — Москва: Главный государственный санитарный врач РФ, 2021. — 469 С. (дата обращения: 13.04.25).
10. Андреева И.В. Сравнительная характеристика растений – гипераккумуляторов по накоплению никеля для целей фиторемедиации. / И.В. Андреева // Агрехимический вестник. — 2013. — 6. — С. 031–033.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Korotchenko I.S. Biodiagnostika sostoyaniya pochv Emel'yanovskogo rajona Krasnoyarskogo kraja v usloviyah transportnoj nagruzki [Biodiagnostics of the soil condition of the Yemelyanovsky district of the Krasnoyarsk Territory under conditions of transport load]. / I.S. Korotchenko, V.A. Medvedeva // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. — 2022. — 3(43). — P. 18–26. [in Russian]
2. Korotchenko I.S. Heavy metals content in the soil cover and woody plants of Krasnoyarsk / I.S. Korotchenko, G.G. Pervyshina, V.A. Medvedeva [et al.] // E3s web of conferences : VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023). — Iss. 390. — Krasnoyarsk : EDP Sciences, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202339004022
3. Bocharnikov V.S. Sposob biologicheskoi ochistki pochvi, zagryaznennoi tyazhelimi metallami [Method of biological purification of soil contaminated with heavy metals] / V.S. Bocharnikov, M.A. Zaichkina, M.A. Denisova et al. // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa. Nauka i visshee professionalnoe obrazovanie [Proceedings of the Nizhnevolzhsk Agrouniversity Complex. Science and higher professional education]. — 2022. — 2(66). — P. 347–353. [in Russian]
4. Meshcheryakova V.Yu. Perspektivi ispolzovaniya razlichnikh rastenii s tselyu fitoremediatsii pochv, zagryaznennikh tyazhelimi metallami [Prospects of using various plants for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals] / V.Yu. Meshcheryakova, N.A. Dyakova, Yu.A. Pavlova // Ulyanovskii mediko-biologicheskii zhurnal [Ulyanovsk Medical and Biological Journal]. — 2024. — 3. — P. 139–154. [in Russian]
5. Rodkin O.I. Fitoremediatsiya kak metod kompleksnogo resheniya ekologicheskikh problem [Phytoremediation as a method of complex solution of environmental problems] / O.I. Rodkin // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle [Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth Sciences]. — 2024. — Vol. 34, 3. — P. 284–295. [in Russian]
6. Drozdova I.V. Akkumulyatsiya nikelya i fitoremediatsionnyi potentsial *Sisymbrium lipskyi* [Nickel accumulation and phytoremediation potential of *Sisymbrium lipskyi*] / I.V. Drozdova, I.B. Kalimova, A.I. Belyaeva et al. // Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza [Ecological Bulletin of the North Caucasus]. — 2024. — Vol. 20, 1. — P. 182–187. [in Russian]
7. Baue'r V.V. Fitoremediaciya kak perspektivnyj metod ochistki pochv ot tyazhelyx metallov [Phytoremediation as a promising method of soil purification from heavy metals]. / V.V. Baue'r, O.Yu. Sartakova, O.M. Gorelova // Polzunovsky Bulletin. — 2023. — 2. — P. 160–165. [in Russian]
8. Kharitonov A.E. Ispolzovanie fitoremediatsii dlya ochistki pochv i vodoyomov ot tyazhyolikh metallov [The use of phytoremediation for the purification of soils and reservoirs from heavy metals] / A.E. Kharitonov, A.N. Fedoseev // Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii [Advances in chemistry and chemical technology]. — 2022. — Vol 36, 2(251). — P. 39–41. [in Russian]
9. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy' obitaniya [SanPiN 1.2.3685 is 21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. — Introduced 2021-01-28. — Moscow: Glavnyj gosudarstvennyj sanitarnyj vrach RF, 2021. — 469 P. (accessed: 13.04.25). [in Russian]

10. Andreeva I.V. Sravnitel'naya xarakteristika rastenij – giperakkumulyatorov po nakopleniyu nikelya dlya celej fitoremediacii [Comparative characteristics of hyperaccumulator plants for nickel accumulation for phytoremediation purposes]. / I.V. Andreeva // Agrochemical Bulletin. — 2013. — 6. — P. 031–033. [in Russian]