

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

.....  
**Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»**  
=====

УДК : 633.853.494:632.122.1:631.445.24

**Оценка эффективности применения ярового рапса в технологии  
индуцированной фитоэкстракции никеля в условиях загрязненной  
дерново-подзолистой почвы**

*Андреева И.В., Габечая В.В., Смелых О.С.*

*РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева*

**Аннотация**

*Представлены результаты вегетационного опыта по оценке фитоэкстракционного потенциала ярового рапса в условиях загрязненной никелем дерново-подзолистой почвы с применением в качестве эффектора фитоэкстракции хелатообразующего агента динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА). Применение ЭДТА в дозе 0,5 ммоль/кг почвы увеличило накопление никеля растениями в 1,9 – 2,4 раза по сравнению с вариантами без применения ЭДТА. По отсутствию фитотоксического эффекта, выносу, значениям коэффициента биологического поглощения и транслокации наибольшая эффективность фитоэкстракции никеля растениями рапса была достигнута при дозах металла в почве на уровне его ориентировочно допустимой концентрации (40 мг/кг).*

**Ключевые слова:** ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ФИТОЭКСТРАКЦИЯ, НИКЕЛЬ, ХЕЛАТООБРАЗУЮЩИЙ АГЕНТ, ДИНАТРИЕВАЯ СОЛЬ ЭТИЛЕНДИАМИНТЕТРАУКСУСНОЙ КИСЛОТЫ (ЭДТА), ЯРОВОЙ РАПС, ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПОЧВА

---

**Введение**

Растущая индустриализация и урбанизация приводят к вовлечению в биогеохимические циклы большого количества тяжелых металлов, содержание которых в компонентах экосистем может достигать опасных для биоты значений. Главными антропогенными источниками никеля считаются сжигание ископаемого топлива, горнодобывающая промышленность, заводы по переработке медно-никелевых и железных

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

.....  
**Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»**  
=====

руд, сталелитейная и цементная промышленность, транспорт и т.д. Из сельскохозяйственных источников поступления никеля в почву можно назвать фосфорные удобрения, осадки сточных вод. В связи с этим определенные опасения вызывает загрязнение данным металлом почв сельскохозяйственных угодий, а учитывая его подвижность в почве и растениях – возможное попадание по пищевой цепи в организм человека.

В последние годы внимание ученых привлекает фиторемедиация - относительно новый подход к восстановлению загрязненных тяжелыми металлами и другими токсикантами почв, при котором используется способность некоторых растений к их активному поглощению и накоплению в своей биомассе. Среди преимуществ такого метода называют его экологичность и, при определенных условиях, экономическую эффективность. Существуют две стратегии в реализации фиторемедиационных технологий: в первом используются дикорастущие растения – гипераккумуляторы металлов, второй подразумевает так называемую индуцированную фитоэкстракцию с применением культурных растений, не являющихся гипераккумуляторами. В последнем случае высоких уровней накопления металлов удается достичь, добавляя в почву различные искусственно синтезируемые или природные хелатообразующие агенты, повышающие растворимость и биодоступность металлов в корнеобитаемой зоне почвы [1]. Из них наиболее широкую известность и применение получили соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) [2]. Немаловажным является также подбор культурных растений, способных к аккумуляции и транспортированию металлов из корней в надземную часть и развивающих большую биомассу. Этому условию удовлетворяют многие представители семейства Капустных [3]. В настоящее время в Глобальную базу данных по гипераккумуляторам (Global Hyperaccumulator Database (uq.edu.au)) помещены 722 вида растений, способных к гипераккумуляции, из них 15% относятся к семейству *Brassicaceae*, причем большинство из них (75%) являются гипераккумуляторами никеля. Одной из наиболее перспективных в этом отношении культур, наряду с горчицей сарептской (*Brassica juncea* L.) является рапс (*Brassica napus* (L.) subsp. *oleifera* Metzg.), хорошо приспособленный к умеренному климату и обладающий высокой продуктивностью.

Таким образом, **целью наших исследований** явилась оценка эффективности применения ярового рапса в фитоэкстракционной технологии очистки дерново-

подзолистой почвы, загрязненной никелем, с применением в качестве эффектора фитоэкстракции хелатообразующего агента динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты.

### **Объекты и методы**

Для решения поставленных задач использовали вегетационный метод. Сосуды Митчерлиха набивали дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой (пахотный горизонт), взятой с территории Полевой опытной станции ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева. Агрохимическая характеристика почвы:  $pH_{KCl}$  - 5,5 ед. pH (ГОСТ 26483-85); гумус (по Тюрину) - 3,7% (ГОСТ 26213-91); содержание подвижных соединений фосфора (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО) - 130,5 мг/кг (IV класс, повышенная обеспеченность) и калия - 161,1 мг/кг (IV класс, повышенная обеспеченность) (ГОСТ Р 54650-2011), содержание подвижной серы - 26,6 мг/кг (ГОСТ 26490-85), содержание  $NH_4^+$ <sub>обм</sub> - 4,7 мг/кг (ГОСТ 26489-85), гидролитическая кислотность - 2,5 мг-экв/100 г, подвижные формы (РД 52.18.289-90) и валовое содержание (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011) никеля - соответственно 2,8 и 21,3 мг/кг почвы. В соответствии с Методическими указаниями Минсельхоза России по обследованию почв сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства на содержание тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов и радионуклидов почва относится ко второй группе - незагрязненная со значениями содержания ТМ ниже ПДК (ОДК) [4].

В качестве фонового макроудобрения использовали нитроаммофоску в соотношении основных питательных веществ 15:15:15. Для полной обеспеченности растений рапса азотом в соответствии с рекомендуемыми З.И. Журбицким [5] нормами в каждый сосуд добавляли азот в форме  $NH_4NO_3$  в количестве 0,7 г/сосуд.

Загрязнение почвы имитировали путем внесения в нее никеля в виде раствора соли  $NiSO_4 \cdot 7H_2O$  в дозах на уровне ориентировочно допустимой концентрации (ОДК) (40 мг/кг почвы) и на уровне 3 ОДК (120 мг/кг почвы). В качестве хелатообразующего агента использовали динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты ( $Na_2$ ЭДТА) (далее - ЭДТА), которую вносили в почву однократно с поливной водой в дозе 0,5 ммоль/кг почвы в начале фазы стеблевания растений. В опыте применяли четырехкратную повторность.

В каждый сосуд высеивали по 12 семян рапса сорта «Оредеж-5». После появления всходов растения прореживали, в одном сосуде оставляли 5 выровненных по высоте проростков. Растения убирали в фазе цветения. Корни выбирали и тщательно отмывали от почвы.

Образцы листьев, стеблей и корней высушивали в сушильном шкафу при температуре 60°C, взвешивали, размалывали, подвергали кислотному разложению в автоклавной микроволновой системе пробоподготовки Milestone Eathos up. Содержание никеля определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре Agilent 240FS AA.

### Результаты исследований

Данные по накоплению биомассы вегетативных органов растений рапса представлены в таблице 1.

Согласно полученным данным, общая биомасса растений в вариантах с внесением никеля в обеих дозах снизилась на 8 – 10% по сравнению с контрольным вариантом на фоне без ЭДТА, главным образом, за счет статистически достоверного снижения массы стеблей.

Таблица 1. Накопление биомассы растениями рапса в зависимости от дозы никеля и наличия хелатообразующего агента ЭДТА в почве, г воздушно-сухой массы/сосуд (*числитель – без ЭДТА, знаменатель – с добавлением ЭДТА в почву*)

Вариант	Листья	Стебли	Корни	Общая биомасса
Контроль (фон)	$15,5 \pm 1,9$	$11,0 \pm 1,1$	$4,0 \pm 0,9$	$30,5$
	$14,3 \pm 1,7$	$8,4 \pm 1,0$	$2,7 \pm 0,8$	$25,4$
Фон + Ni (40 мг/кг)	$14,9 \pm 1,1$	$9,7 \pm 2,4$	$3,2 \pm 0,6$	$27,8$
	$14,7 \pm 1,5$	$9,9 \pm 0,8$	$3,1 \pm 0,8$	$27,7$
Фон + Ni (120 мг/кг)	$15,5 \pm 0,8$	$8,4 \pm 1,0$	$4,4 \pm 0,6$	$28,3$
	$14,4 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,3$	$19,6$

Однако более значительное уменьшение общей биомассы – на 23% по сравнению с контролем наблюдалось в варианте с дозой никеля 120 мг/кг на фоне ЭДТА также вследствие существенного снижения биомассы стеблей. Изменение по вариантам опыта биомассы листьев и корней оказалось статистически недостоверным как в присутствии хелатообразующего агента, так и без него. Снижение биомассы под воздействием ЭДТА и

ухудшение физиологических параметров растений, таких как содержание хлорофилла, интенсивность фотосинтеза и дыхания, устьичная проводимость, отмечали и другие авторы [6]. В то же время, применение хелатообразующих агентов после начала вегетации растений и накопления ими достаточного количества биомассы является одним из вариантов снижения экологических рисков [7]. Наши исследования (не опубликованы) также показали, что внесение ЭДТА в почву перед посевом имело больший токсический эффект на прорастание семян и состояние проростков, чем его добавление в почву с поливной водой во время вегетации растений.

В таблице 2 представлены данные по содержанию никеля в надземных органах и корнях рапса, которые свидетельствуют о том, что данный показатель возрастал во всех вегетативных органах растений независимо от дозы металла и присутствия ЭДТА в почве. Так, при дозе никеля в почве 40 мг/кг его содержание в листьях, стеблях и корнях повысилось соответственно в 506, 17 и 2,7 раза на фоне без ЭДТА вследствие низкого содержания металла в надземных вегетативных органах контрольного варианта. При повышении дозы никеля в почве до 120 мг/кг уровень его накопления в листьях не менялся, а в стеблях и корнях снижался соответственно в 6,1 и 2,8 раза по сравнению с вариантом 40 мг Ni/кг.

Добавление хелатообразующего агента существенно увеличило содержание никеля во всех органах растений, включая контрольный вариант, на котором содержание металла в листьях и стеблях возросло соответственно в 49 и 40 раз.

Таблица 2. Содержание никеля в разных частях растений ярового рапса, мг/кг (числитель – без ЭДТА, знаменатель – с добавлением ЭДТА в почву)

Вариант	Листья	Стебли	Корни
Контроль	$0,08 \pm 0,06$ $3,9 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,04$ $4,0 \pm 0,3$	$15,2 \pm 1,7$ $15,7 \pm 1,0$
Фон + Ni (40 мг/кг)	$40,5 \pm 1,4$ $80,5 \pm 5,1$	$16,6 \pm 0,6$ $49,3 \pm 2,2$	$41,1 \pm 1,4$ $64,9 \pm 2,5$
Фон + Ni (120 мг/кг)	$39,7 \pm 5,1$ $79,0 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$ $6,1 \pm 0,4$	$14,6 \pm 2,9$ $71,0 \pm 3,1$

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  
 .....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**  
 =====

Наибольшее содержание никеля было обнаружено в листьях растений рапса, которое составило около 40 мг/кг без ЭДТА и вдвое больше – на фоне ЭДТА. При повышении дозы металла с 40 до 120 мг/кг почвы содержание никеля в листьях не менялось, а в стеблях – снижалось, что, по-видимому, объясняется действием в растениях защитных механизмов от избытка токсичных ионов в среде произрастания. При этом в присутствии ЭДТА никель продолжил накапливаться в корнях и при наибольшей дозе элемента.

Результаты расчета выноса никеля растениями рапса представлены в таблице 3. Отмечается чрезвычайно низкий вынос никеля в контрольном варианте, который примерно на порядок повышался при добавлении в почву хелатообразующего агента.

При внесении никеля в дозе на уровне ОДК его вынос возрастал как в надземных органах, так и в корнях, однако при дальнейшем увеличении дозы до 3 ОДК накопление элемента либо почти не изменялось (листья), либо снижалось (стебли и корни). Таким образом, наибольший вынос металла наблюдался в варианте с дозой никеля в почве 40 мг/кг и составил 0,77 мг/сосуд без ЭДТА. В присутствии хелатообразующего агента тенденция была схожей: наибольший вынос никеля демонстрировали растения в варианте с дозой никеля на уровне ОДК, который достигал величины 1,87 мг/сосуд, что в 2,4 раза выше, чем на фоне без ЭДТА. В варианте 120 мг Ni/кг почвы накопление элемента снизилось по сравнению с дозой на уровне ОДК на 42%. Повышенное поглощение никеля на фоне применения эффектора фиторемедиации может быть связано с увеличением биодоступности металла в почве, что отмечают и другие авторы [8].

Таблица 3. Вынос никеля различными органами ярового рапса, мг/сосуд (числитель – без ЭДТА, знаменатель – с добавлением ЭДТА в почву)

Вариант	Часть растения			Общий вынос
	Листья	Стебли	Корни	
Контроль (фон)	$\frac{0,001}{0,06}$	$\frac{0,001}{0,03}$	$\frac{0,06}{0,04}$	$\frac{0,06}{0,13}$
Фон + Ni (40 мг/кг)	$\frac{0,60}{1,18}$	$\frac{0,04}{0,49}$	$\frac{0,13}{0,20}$	$\frac{0,77}{1,87}$
Фон + Ni (120 мг/кг)	$\frac{0,62}{1,14}$	$\frac{0,02}{0,02}$	$\frac{0,06}{0,16}$	$\frac{0,70}{1,32}$

На основе показателей выноса было рассчитано время, требуемое для очистки загрязненной никелем почвы на уровне 3 ОДК до приемлемого нормативного значения на уровне ОДК с учетом фоновых значений содержания никеля в почве. При однократной уборке растений рапса в фазе цветения за вегетационный сезон на очистку почвы в случае неиндуцированной фитоэкстракции понадобится 95 лет. Применение в качестве эффектора фитоэкстракции ЭДТА срок очистки почвы снизится до 50 лет. При двукратной уборке растений рапса за вегетационный сезон можно снизить время очистки почвы вдвое. Очевидно, что на практике с помощью подбора подходящей дозы эффектора фитоэкстракции и способа его применения для конкретных климатических и почвенных условий приведенные расчетные сроки очистки возможно снизить.

Для оценки фиторемедиационного потенциала ярового рапса по отношению к никелю необходимо принимать во внимание относительную подвижность данного элемента в компонентах экосистем, которую можно оценить по коэффициентам биологического поглощения (КБП) и транслокации (КТ) [9]. Коэффициент биологического поглощения представляет собой соотношение содержания элемента в надземной части растения к валовому содержанию его в почве. Коэффициент транслокации рассчитывается как соотношение содержания элемента в надземной биомассе к его содержанию в корнях и характеризует мобильность элемента внутри растения. Эффективность фитоэкстракции обеспечивают те виды растений, которые обладают значениями КБП и КТ выше единицы.

Рассчитанные для ярового рапса КБП и КТ в отношении никеля представлены в таблице 4. Согласно расчетным данным, коэффициент биологического поглощения никеля у растений рапса во всех вариантах независимо от присутствия эффектора фитоэкстракции был меньше единицы, за исключением варианта с внесением в почву металла на уровне ОДК на фоне ЭДТА, где КБП составил 1,22. Необходимо отметить, что в этом же варианте коэффициент транслокации также превысил единицу и составил 1,15. Выше этого показатель КТ оказался только в варианте с внесением в почву никеля в дозе 120 мг/кг без ЭДТА, однако КБП при этом был очень низким – 0,22.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных и расчетных данных яровой рапс обладает определенным потенциалом в индуцированной фитоэкстракции никеля при загрязнении данным элементом почвы на уровне умеренных концентраций, однако при более высоком содержании элемента применение данной культуры для очистки

почвы становится неэффективным. Тем не менее, можно рассмотреть рапс в качестве фиторемедианта для деградированных почв с относительно невысокой степенью загрязнения тяжелыми металлами, учитывая известные фитосанитарные и средовосстанавливающие свойства данной культуры, а также установленную в наших исследованиях [10] относительную устойчивость рапса к загрязнению почвы тяжелыми металлами, а также его высокий потенциал к биоаккумуляции такого элемента, как цинк.

Таблица 4. Коэффициенты биологического поглощения и транслокации никеля у растений ярового рапса (*числитель – без ЭДТА, знаменатель – с добавлением ЭДТА в почву*)

Вариант	Коэффициент биологического поглощения	Коэффициент транслокации
Контроль (фон)	$\frac{0,004}{0,19}$	$\frac{0,005}{0,25}$
Фон + Ni (40 мг/кг)	$\frac{0,59}{1,22}$	$\frac{0,87}{1,15}$
Фон + Ni (120 мг/кг)	$\frac{0,22}{0,47}$	$\frac{2,12}{0,94}$

### Выводы

1. В условиях вегетационного опыта установлено, что внесение в дерново-подзолистую почву никеля на уровне ориентировочно допустимой концентрации (40 мг/кг) и фактора фиторемедиации ЭДТА в дозе 0,5 ммоль/кг почвы не оказывало фитотоксический эффект на растения ярового рапса, тогда как увеличение дозы металла в почве до 120 мг/кг снизило накопление общей биомассы растений на 22% по сравнению с контрольным вариантом.

2. Увеличение дозы никеля в почве сопровождалось повышением уровня его содержания в надземной биомассе растений рапса как в присутствии ЭДТА, так и без него. Наибольшее содержание никеля было обнаружено в листьях и составило 40,5 мг/кг без ЭДТА и вдвое больше – на фоне применения ЭДТА.

3. Наибольшим выносом никеля (1,87 мг/сосуд) отличались растения варианта с дозой никеля в почве на уровне ОДК и внесением ЭДТА, что в 2,4 раза выше, чем в варианте



с почвой, не обработанной хелатообразующим агентом. В варианте 120 мг Ni/кг почвы вынос элемента снизился по сравнению с его дозой на уровне ОДК на 42%.

4. Расчеты коэффициентов биологического поглощения и транслокации показали, что приемлемым вариантом для проведения фитоэкстракции никеля из изученных являлся вариант с дозой никеля в почве на уровне ориентировочно допустимой концентрации (40 мг/кг) в присутствии хелатообразующего агента ЭДТА.

#### Список использованных источников

1. Bian X., Cui J., Tang B., Yang L. Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: a review // Pol. J. Environ. Stud. - 2018. - V. 27. - № 6. - P. 2417 - 2424. DOI: 10.15244/pjoes/81207.
2. Kaur L., Gadgil K., Sharma S. Comparative study of natural phytoextraction and induced phytoextraction of lead using mustard plant (*Brassica juncea* Arawali) // International Journal of Bioassays. - 2013. - V. 02 (01). - P. 352 - 357.
3. Delil A.D., Kokeli N. Chelate-induced phytoextraction potential of *Brassica rapa* for soil contaminated with nickel // European Journal of Engineering and Natural Sciences. - 2017. - V. 2. - Iss. 1. - P. 194 - 203.
4. Методические указания по обследованию почв сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства на содержание тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов, радионуклидов (утв. зам. Министра сельского хозяйства и продовольствия РФ 15.12.1995 г. А.В. Колгановым).
5. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. - М.: Наука, 1968. - 266 с.
6. Anwar S., Ashraf M.I., Khan S., Omer S., Noman A. Physiological characteristics of maize under chelators induced phytoextraction of cadmium // Abstract of Applied Sciences and Engineering. - 2016. - V. 9. - P. 23. DOI: 10.18488/journal.1001/2016.9/1001.9.
7. Vamerali T., Bandiera M., Lucchini P., Mosca G. Metal partitioning in plant-substrate-water compartments under EDDS-assisted phytoextraction of pyrite waste with *Brassica carinata* A. Braun // Environmental Science and Pollution Research. - 2015. - V. 22. - P. 2434 – 2446. DOI:10.1007/s11356-014-3003-8.
8. Singh S.K., Ramprakash, Kumari S., Duhan D.S. Phytoextraction of Ni from contaminated soil by *Brassica juncea* as influenced by chelating agents // Annals of Biology. - 2013. - V. 29 (1). - P. 15 - 18.
9. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах (учебное пособие). - М.: Агроконсалт, 2002. - 200 с.
10. Andreeva I.V., Samardžić M., Vasenev I.I. Ecological assessment of rapeseed

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

.....  
*Электронный научно-производственный журнал*  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====  
cultivation to improve chemically degraded urban Albic Luvisol // Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure. SSC 2020. Vasenev V. et al. (eds). - Springer Geography. - Springer, Cham. - 2021. - P. 283 - 291. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75285-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75285-9_27).

=====  
**Цитирование:**

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 [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 4. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/4/st\\_417.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/4/st_417.pdf). DOI: <https://doi.org/10.51419/202124417>.