

## ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДВУХ ВИДОВ СЕМЕЙСТВА BRASSICACEA

Н.С. Репкина, *ст. науч. сотр.*

Н.М. Казнина, *вед. науч. сотр.*

Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»  
(Россия, г. Петрозаводск)

DOI:10.24412/2500-1000-2022-11-1-38-42

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-00668.

**Аннотация.** В последние годы для очистки загрязненных тяжелыми металлами территорий повышенное внимание уделяется представителям семейства *Brassicaceae*, как потенциальным кандидатам для использования в фиторемедиации почв. В работе изучено влияние цинка, как одного из наиболее распространенных загрязнителей из группы тяжелых металлов, в концентрациях 5 (контроль), 50, 100, 150 мг/кг субстрата на рост побега двух представителей этого семейства – горчицы белой (*Sinapis alba*) и горчицы сарептской (*Brassica juncea*). Исследована способность растений к накоплению ионов цинка в корнях и побегах в этих условиях. С целью выяснения поглотительных свойств этих видов, по завершению опыта было определено содержание цинка в субстрате. Установлено, что высокие концентрации цинка негативно влияют на рост растений, но не вызывают их гибели. При этом они накапливали цинк в большом количестве в корнях и побегах, причем практически в равной степени. Кроме того, после выращивания растений на загрязненных субстратах, концентрация цинка в них заметно снижалась, что доказывает способность *S. alba* и *B. juncea* активно поглощать металл из почвы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности использования обоих видов в фиторемедиации загрязненных цинком территорий.

**Ключевые слова:** горчица, загрязнение, цинк, рост, фиторемедиация.

Цинк является важным микроэлементом для жизнедеятельности растений (Natasha et al., 2022; Stanton et al., 2022). Он вовлечен во множество биохимических реакций и выполняет ряд функций, необходимых для поддержания метаболизма (Stanton et al., 2022). Однако в высоких концентрациях он токсичен для растений (Ricachenevsky et al., 2015; Natasha et al., 2022).

Основной причиной значительного повышения содержания цинка в окружающей среде являются выбросы промышленных предприятий и внесение большого числа цинк содержащих минеральных удобрений, гербицидов и фунгицидов. Исходя из этого, в последнее время поиск экологических подходов и технологий, позволяющих очищать загрязненные почвы, весьма актуален (Ricachenevsky et al.,

2015). Одной из перспективных и экономически выгодных в этом плане технологий является фиторемедиация – использование растений для очистки (фитоэкстракция) и стабилизации (фитостабилизация) загрязненных почв (Naq et al., 2020). Однако для успешного их применения требуются устойчивые к избытку цинка виды растений, способные накапливать его в относительно больших количествах. В связи с этим чрезвычайно актуальным является поиск и изучение видов растений с высоким фиторемедиационным потенциалом. В этой связи все больший интерес уделяется семейству *Brassicaceae*.

*S. alba* L. (горчица белая) и *B. juncea* (горчица сарептская) являются представителями этого семейства. Они имеют важное сельскохозяйственное значение, в

частности, являются хорошими сидератами, используются в качестве сырья для производства масла и специй, применяются в медицине (Yaniv et al., 1994). При этом обнаружено, что по сравнению с другими видами *Brassicaceae*, растения *S. alba* и *B. juncea* более устойчивы к ряду стресс-факторов, в том числе к тяжелым металлам (Brown et al., 1997). На основании этого высказано предположение, что горчица белая и горчица сарептская могут быть использованы при очистке загрязненных тяжелыми металлами, в частности цинком, почв (Soleimannejad et al., 2020). Однако экспериментальных данных, подтверждающих это, относительно немного.

Учитывая это, целью данной работы явилось изучение фиторемедиационного потенциала *S. alba* и *B. juncea* в условиях избытка цинка в корнеобитаемой среде.

#### Материалы и методы

Семена горчицы белой (*Sinapis alba* L. сорт Бельгия) и горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern. сорт Славянка) были получены из коллекции Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР) Министерства науки и высшего образования (Россия). Растения выращивались в сосудах (5 литров) на песке в вегетационном домике. Плотность посева 12 растений на сосуд. Соль цинка ( $ZnSO_4$ ) вносилась разово перед посевом в концентрации (по элементу): 5 (контроль), 50, 100 и 150 мг/кг. Растения поливали питательным раствором Хогланда-Арнона (без добавления цинка). Анализ ростовых показателей проводили на стадии 4–5 настоящего листа. Образцы корня и побега для химического анализа фиксировали на стадии созревания семян.

Рост растений анализировали общепринятым методом. Сырая биомасса изме-

рялась сразу же после фиксирования материала. Сухая биомасса определялась после высушивания при  $70^\circ C$  до неизменяющегося значения веса.

Анализ содержания металлов проводился масс-спектрометрическим методом с использованием ICP-MS (Aligent, США). С предварительным разложением образцов в растворе кислот  $HNO_3 : HCl$  (4:1) в системе микроволнового разложения Berghof Speed wave Xpert Microwave Digestion System.

Эксперимент проводился в трехкратной повторности. Статистическая обработка данных проводилась с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), для оценки значимости использовался критерий Фишера. Данные представлены как среднее значение  $\pm$  стандартная ошибка. В статье обсуждаются величины значимые при  $P \leq 0.05$ .

#### Результаты и обсуждение

В ходе исследований обнаружено, что цинк в концентрации 50 мг/кг субстрата не влиял на рост горчицы белой. Высота побега, а также сырая и сухая биомассы у растений этого варианта практически не отличались от контрольных растений. Повышение концентрации металла до 100 и 150 мг/кг субстрата приводило к уменьшению высоты побега (на 55 и 73%, соответственно) (табл. 1). При этом значительно снижались также его сырая и сухая биомассы (табл. 1). В отличие от этого, рост растений горчицы сарептской тормозился уже при действии цинка в концентрации 50 мг/кг субстрата (табл. 1). При этом, по мере увеличения концентрации металла степень ингибирования высоты побега и его сухой биомассы возрастала. Однако накопление сырой биомассы побега при концентрации цинка 50 мг/кг сохранялось на уровне контроля (табл. 1).

Таблица 1. Влияние избытка цинка в субстрате на рост побега у растений *S. alba* и *B. juncea*

Вид растения	Концентрация Zn, мг/кг субстрата	Высота побега, см	Сырая биомасса побега, г	Сухая биомасса побега, г
<i>S. alba</i>	5	26,21±1,84a	1,27±0,14a	0,11±0,01ab
	50	23,49±1,26ab	1,36±0,15a	0,11±0,01ab
	100	11,66±0,51d	0,46±0,04b	0,05±0,004dc
	150	6,94±0,48f	0,27±0,03c	0,03±0,003d
<i>B. juncea</i>	5	23,63±1,10b	1,28±0,07a	0,13±0,01a
	50	17,75±0,71c	1,09±0,12a	0,09±0,01bc
	100	12,32±0,85d	0,67±0,10b	0,07±0,01c
	150	8,61±0,55e	0,39±0,05b	0,04±0,01d

Здесь и далее в таблицах, разные буквы отображают разницу между вариантами при ( $p < 0,05$ ) (ANOVA).

Аналогичный эффект избытка цинка на рост побега отмечался ранее у других видов этого семейства, в частности, у *B. oleracea* (Barrameda-Medina et al., 2014) и *B. napus* (Feigl et al., 2016). Отрицательное воздействие металла на процесс роста растений, как полагают, может являться результатом замедления клеточного деления из-за увеличения продолжительности фаз митоза и всего митотического цикла, нарушения растяжения клеток вследствие снижения эластичности клеточных стенок или уменьшения их тургора. Нельзя исключить и изменение других физиологических процессов, в том числе фотосинте-

за, водного режима и минерального питания (Титов и др., 2007).

Анализ содержания цинка в растениях *S. alba* показал, что по мере увеличения концентрации металла в субстрате его содержание в подземных и надземных органах значительно возрастает (табл. 2). При этом количество металла в корнях и побегах при наиболее высоких концентрациях цинка в субстрате (100 и 150 мг/кг) оказалось практически равным. Содержание цинка в органах растений *B. juncea* было меньше, чем у *S. alba* (табл. 2). Кроме того, при концентрациях 50 и 100 мг/кг субстрата оно было больше в корнях, чем в побегах, а при 150 мг/кг – практически одинаковым.

Таблица 2. Содержание цинка в растениях *S. alba* и *B. juncea* в условиях его избытка в субстрате

Вид растения	Концентрация Zn, мг/кг субстрата	Концентрация Zn, мг/кг	
		побег	корень
<i>S. alba</i>	5	187,32±20,60f	115,01±14,80e
	50	2505,31±206,02c	1504,60±125,96e
	100	2620,35±215,22b	2708,28±222,26b
	150	3118,52±311,08a	3340,07±272,80a
<i>B. juncea</i>	5	77,48±10,78g	170,59±19,25f
	50	1450,23±121,62e	2169,80±179,18c
	100	1849,71±153,58d	2174,27±179,54c
	150	2239,21±184,74c	2379,11±195,93c

В отношении горчицы белой ранее уже было показано в единичных работах, что она способна поглощать ионы цинка в большом количестве, произрастая на загрязненных этим металлом почвах. Однако большая часть металла задерживается у нее в корнях (Fargašova, 2001). Нами было установлено, что при высоких concentra-

циях цинка растения этого вида накапливают металл и в побегах, причем в такой же концентрации, что и в корнях. Аналогичные данные были получены также другими авторами (Soleimannejad et al., 2020).

Способность горчицы сарептской накапливать высокие концентрации цинка хорошо известна. Более того, считается,

что она является гипераккумулятором цинка, поскольку обнаружена возможность значительного накопления металла в надземных органах растений этого вида (Raskin et al., 1997; Прасад, 2003 – по: Титов и др., 2007). Однако в наших исследованиях мы такого эффекта не наблюдали, что, возможно, связано с условиями проведения опыта.

Помимо растительных образцов, было проанализировано содержание цинка в субстратах после роста на них растений. Результаты анализа показали, что по завершении опыта в вариантах с использованием цинка в концентрациях 100 и

150 мг/кг содержание металла в субстрате уменьшается, причем после выращивания на них как горчицы белой, так и горчицы сарептской (табл. 3). Это свидетельствует об усилении поглощения металла растениями обоих видов в этих условиях, что приводит к уменьшению его содержания в корнеобитаемой среде.

**Закключение.** Таким образом, цинк в высоких концентрациях (100 и 150 мг/кг) тормозит рост растений *S. alba* и *B. juncea*, однако не приводит к полной его остановке. Более того, при этих концентрациях оба вида растений достигают.

Таблица 3. Содержание цинка в субстрате после выращивания *S. alba* и *B. juncea*

Вид растения	Вносимая в начале опыта концентрация Zn, мг/кг субстрата	Концентрация Zn в субстрате при завершении опыта, мг/кг сух.веса
<i>S. alba</i>	5	15,93±2,65d
	50	60,15±8,53bc
	100	75,72±10,55b
	150	90,05±12,42b
<i>B. juncea</i>	5	18,76±3,10d
	50	51,72±7,43c
	100	55,05±7,87c
	150	119,25±15,14a

стадии созревания семян. Торможение роста в таких условиях, вероятно, связано с высоким содержанием цинка в надземных органах растений (более 3000 мг/кг сух. массы у *S. alba* и более 2000 мг/кг сух. массы у *B. juncea*). При этом заметно снижается содержание цинка в субстрате. В целом, способность *S. alba* и *B. juncea* успешно произрастать при высоких кон-

центрациях цинка в корневой среде, накапливая при этом большое количество металла в органах и снижая его содержание в субстрате, позволяет говорить о высоком фиторемедиационном потенциале обоих изученных видов растений и перспективности их использования для очистки почв, загрязненных цинком.

#### Библиографический список

1. Barrameda-Medina Y., Montesinos-Pereira D., Romero L., Blasco B., Ruiz J.M. Role of GSH homeostasis under Zn toxicity in plants with different Zn tolerance. *Plant Sci.* – 2014. – № 227. – P. 110-121. DOI:10.1016/j.plantsci.2014.07.010.
2. Brown J., Brown A.P., Davis J.B., Erickson D. Intergeneric hybridization between *Sinapis alba* and *Brassica napus*. *Euphytica.* – 1997. – №93. – P. 163-168.
3. Fargašova A. Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots. *Biologia Plantarum.* – 2001. – №44. – P. 471-473.
4. Feigl G., Kolbert Z., Lehotai N., Molnár Á., Ördög A., Bordé Á., Laskay G., Erdei L. Different zinc sensitivity of *Brassica* organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern. *Ecotox. Environ. Safety.* – 2016. – №125. – P. 141-152. DOI:10.1016/j.ecoenv.2015.12.006.
5. Haq S., Bhatti A.A., Dar Z.A., Bhat S.A. Phytoremediation of heavy metals: an eco-friendly and sustainable approach. In: *Bioremediation and Biotechnology*, Eds.; Hakeem, K.R. et al. Springer, Switzerland, 2020. – pp. 215-231. DOI:10.1007/978-3-030-35691-0\_10.

6. Natasha N., Shahid M., Bibi I., Iqbal J., Khalid S., Murtaza B., Bakhat H.F., Farooq A.B.U., Amjad M., Hammad H.M., Niazi N.K., Arshad M. Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Sci. Total Environ.* – 2022. – №808. – P. 152024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152024.

7. Ricachenevsky F.K., Menguer P.K., Sperotto R.A., Fett J.P. Got to hide your Zn away: Molecular control of Zn accumulation and biotechnological applications. *Plant Science.* – 2015. – №236. – P. 1-17. DOI: 10.1016/j.plantsci.2015.03.009.

8. Solelmannejad Z., Sadeghpour H.R., Abdolzadeh A., Golallpour M. Physiological responses of white mustard grown in Zn-contaminated soils. *Acta Physiol. Plant.* – 2020. – №42. – P. 131-145. DOI:10.1007/s11738-020-03119-8.

9. Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. *Molec.Plant.* – 2022. – № 15. – P. 65-85. DOI:10.1016/j.molp.2021.12.008.

10. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. – 172 с.

## PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF TWO SPECIES OF THE BRASSICACEA FAMILY

**N.S. Repkina**, *Senior Research*

**N.M. Kaznina**, *Leading Researcher*

**Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(Russia, Petrozavodsk)**

**Abstract.** *In recent years, in order to clean up areas contaminated with heavy metals, increased attention has been paid to representatives of the Brassicaceae family as potential candidates for use in soil phytoremediation. The effect of zinc, as one of the most common pollutants from the group of heavy metals, at concentrations of 5 (control), 50, 100, 150 mg/kg of substrate on the shoot growth of two representatives of this family, white mustard (*Sinapis alba*) and sareptskaya mustard (*Brassica juncea*), was studied. The ability of plants to accumulate zinc ions in roots and shoots under these conditions was studied. In order to clarify the absorption properties of these species, at the end of the experiment, the zinc content in the substrate was determined. It has been established that high concentrations of zinc negatively affect the growth of plants, but do not cause their death. At the same time, they accumulate zinc in large quantities in the roots and shoots, and almost equally. In addition, after growing plants on contaminated substrates, the concentration of zinc in them decreases, which proves the ability of these species to actively absorb metal from the soil. The results obtained indicate the possibility and prospects of using both species (*S. alba* and *B. juncea*) in phytoremediation of zinc contaminated areas.*

**Keywords:** *mustard, contamination, zinc, growth, phytoremediation.*