

УДК 581.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗБЫТКА ЦИНКА НА РОСТ ПОБЕГА *SINAPIS ALBA* L. И *BRASSICA JUNCEA* (L.) CZERN.

Н. С. Репкина*, И. А. Нилова, Н. М. Казнина

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
*nrt9@ya.ru

Исследовано влияние высоких концентраций цинка на рост побега горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.). Согласно данным литературы, *B. juncea* является гипераккумулятором цинка и накапливает металл в высоких концентрациях в надземных органах. В отличие от этого *S. alba* относится к так называемым исключателям и задерживает цинк в большей степени в корнях. Известно, что оба вида способны произрастать на загрязненных цинком почвах, однако данные об устойчивости растений к высоким концентрациям этого металла, в том числе на уровне физиологических процессов, противоречивы. В условиях лабораторного опыта изучено влияние цинка в концентрациях 5 (контроль), 25, 50, 100, 150 и 200 мг/кг субстрата на ряд показателей роста побега у *S. alba* с. Радуга и *B. juncea* с. Славянка. Исследования показали, что воздействие цинка на рост побега зависит от концентрации металла в корнеобитаемой среде, а также вида растений. Так, у *S. alba* цинк в концентрации 25 и 50 мг/кг субстрата оказывал стимулирующее действие на изученные параметры роста, более высокие концентрации металла (100–200 мг/кг субстрата) приводили к их снижению. У *B. juncea* уже при концентрации металла 50 мг/кг субстрата уменьшались высота побега и площадь листьев и по мере увеличения концентрации негативный эффект усиливался. Предполагается, что более сильное отрицательное воздействие цинка в высоких концентрациях на рост побега *B. juncea*, как гипераккумулятора, по сравнению с *S. alba* связан с большим содержанием металла в его надземных органах. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования изученных сортов *S. alba* и *B. juncea* в фиторемедиации загрязненных цинком территорий.

Ключевые слова: цинк; горчица; рост; биомасса; устойчивость

Для цитирования: Репкина Н. С., Нилова И. А., Казнина Н. М. Сравнительный анализ воздействия избытка цинка на рост побега *Sinapis alba* L. и *Brassica juncea* (L.) Czern. // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 7. С. 85–91. doi: 10.17076/eb1640

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

N. S. Repkina, I. A. Nilova, N. M. Kaznina. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECT OF ZINC EXCESS ON SHOOT GROWTH IN *SINAPIS ALBA* L. AND *BRASSICA JUNCEA* (L.) CZERN.

*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nrt9@ya.ru*

We studied the effect of zinc excess on shoot growth in white mustard (*Sinapis alba* L.) and brown mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern.). Nowadays, *B. juncea* is regarded as a zinc hyperaccumulator – accumulating its high concentrations in above-ground organs. In contrast, *S. alba* is an “excluder”, mostly accumulating the metal in roots. We know that both species can grow on zinc-contaminated soils, but less is known about their tolerance of the metal. The data about their physiological reactions to excess metal influence are contradictory. We performed a laboratory experiment to study the effect of zinc at concentrations of 5 (control), 25, 50, 100, 150 and 200 mg per kg of substrate on shoot growth parameters in *S. alba* cv. Raduga and *B. juncea* cv. Slavyanka. In this study, the effect of zinc on shoot growth mostly depended on the zinc concentration in the substrate as well as on the plant species. Thus, zinc at 25 and 50 mg/kg had a stimulating effect on the growth of *S. alba* shoots and only higher concentrations (100–200 mg/kg) led to a decrease in the studied parameters. In *B. juncea*, even the 50 mg/kg concentration caused shoot height and leaf area to decrease. Elevation of zinc concentrations further promoted this negative effect. We suppose that the stronger detrimental effect of zinc at the studied concentrations on shoot growth in *B. juncea* as a hyperaccumulator compared to *S. alba* is associated with a higher content of the metal in its aboveground parts. Our results demonstrate the possibility of using the studied varieties of *S. alba* and *B. juncea* in the phytoremediation of zinc-contaminated soils.

Key words: zinc; mustard; growth; biomass; tolerance

For citation: Repkina N. S., Nilova I. A., Kaznina N. M. Comparative analysis of the effect of zinc excess on shoot growth in *Sinapis alba* L. and *Brassica juncea* (L.) Czern. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 7. P. 85–91. doi: 10.17076/eb1640

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 22-24-00668.

Введение

Растения семейства *Brassicaceae* имеют широкую географию распространения [Charles, 2013]. Как правило, это однолетние виды, являющиеся важными сельскохозяйственными культурами. Многие из них используются для производства масла, лекарственных препаратов, в пищевой промышленности, в животноводстве, а также в качестве сырья для биотоплива [Charles, 2013; Mourato et al., 2015]. Известно, что представители этого семейства способны произрастать в условиях довольно высоких концентраций цинка в почве [Clemens, 2006; Grotz, Guerinot, 2006; Радионов и др., 2007]. Более того, некоторые из представителей этого семейства являются гипераккумуляторами цинка, такие, например, как *Brassica juncea* (L.) Czern., что объясняет повышенный интерес к изучению способности растений этого вида накапливать высокие концентрации металла в органах без ущерба их жизнедеятельности [Прасад, 2003; Sridhar et al., 2005; Проценко, Неведров, 2013; Chaudhry

et al., 2020]. Подобные исследования важны с точки зрения оценки возможного использования горчицы сарептской в фитоэкстракции загрязненных цинком почв. Однако для успешного применения растений в этой технологии помимо высокого содержания металла в побегах необходима и их высокая устойчивость к цинку, но таких данных в отношении *B. juncea* относительно немного.

Не менее важна для восстановления загрязненных цинком почв и фитостабилизация, для которой перспективными являются виды, произрастающие в условиях избытка этого металла в корнеобитаемой среде, но неспособные к его сверхнакоплению (так называемые исключатели). Показано, что для фитостабилизации можно использовать растения семейства *Brassicaceae*, в том числе горчицу белую, *Sinapis alba* L., хотя в отношении ее устойчивости к избытку цинка данные противоречивы. Так, некоторые авторы свидетельствуют о ее чувствительности к металлу [Fargasova, 2001], тогда как другие, напротив, характеризуют этот вид как устойчивый [Zalewska, Nogalska, 2014].

Целью данной работы явилось сравнительное изучение влияния цинка в высоких концентрациях на рост растений *S. alba* и *B. juncea*.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований использовали проростки горчицы белой (*Sinapis alba* L.) сорта Радуга и горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.) сорта Славянка. Семена были получены отделом генетических ресурсов масличных и прядильных культур ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова». Растения выращивались в сосудах (0,8 л) на песчаном субстрате в течение 20 сут при температуре воздуха 22 °С, его относительной влажности 60–70 %, освещенности около 10 клк и 14-часовом фотопериоде. Цинк в форме сульфата ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) в концентрациях 5 (контроль), 25, 50, 100, 150 и 200 мг/кг вносился в песчаный субстрат в сухом виде одноразово при закладке опыта. Полив осуществляли питательным раствором Хогланда – Арнона (без добавления цинка): KH_2PO_4 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 , $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$, микроэлементы.

О воздействии избытка цинка на рост растений судили по изменению (по отношению к контролю) высоты побега, площади листьев и сырой и сухой биомассе побега. Линейные размеры корня и побега измеряли общепринятым методом. Площадь листа определяли с исполь-

зованием программы AreaS. Сырую биомассу измеряли сразу же при фиксации материала, сухую биомассу растений определяли после высушивания при 60 °С до постоянного (полностью сухого) веса.

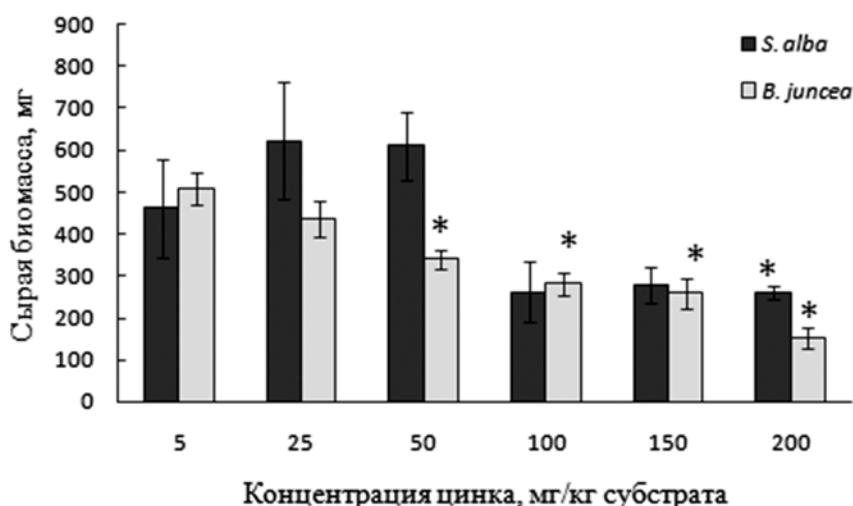
Биологическая повторность в пределах одного варианта опыта 10-кратная. Достоверность различий между вариантами опытов оценивали с помощью критерия Стьюдента (при $p < 0,05$). На рисунке приведены средние арифметические значения из нескольких независимых опытов и их стандартные ошибки. В статье обсуждаются величины, достоверные при $p < 0,05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования КарНЦ РАН «Комплексные фундаментальные и прикладные исследования особенностей функционирования живых систем в условиях Севера».

Результаты и обсуждение

Показатели роста растений, как известно, являются хорошими визуальными индикаторами их устойчивости к тяжелым металлам, в том числе к избытку цинка [Титов и др., 2011]. При этом у более устойчивых видов эти показатели в присутствии высоких концентраций металлов, как правило, изменяются (по отношению к контролю) в меньшей степени, чем у более чувствительных [Казнина, 2016].

В наших исследованиях цинк в концентрации 25 мг/кг субстрата оказывал стимулирую-



Влияние избытка цинка на сырую биомассу (мг) побега *S. alba* с. Радуга и *B. juncea* с. Славянка.

* Здесь и в таблицах различия достоверны относительно контроля

Effect of zinc excess on shoot fresh weight (mg) of *S. alba* cv. Raduga and *B. juncea* cv. Slavyanka.

* Here and in tables, the differences from the control are significant

щее действие на высоту побега *S. alba* (табл. 1), в концентрации 50 мг/кг субстрата значимых изменений этого показателя не наблюдалось, дальнейшее же повышение концентрации металла вызвало торможение роста побега, высота которого оказалась в 1,5–2 раза ниже, чем в контроле. Стимулирующий эффект цинка на рост, вероятно, связан с его необходимостью для жизнедеятельности растений, поскольку этот металл выполняет большое число разнообразных функций в растительной клетке [Zhang, Gladyshev, 2011; Sinclair, Krämer, 2012]. В отличие от этого у *B. juncea* наименьшая концентрация цинка не влияла на рост побега, тогда как более высокие концентрации (50–200 мг/кг субстрата) приводили к снижению его высоты (в 1,2–2,2 раза по отношению к контролю в зависимости от концентрации).

Аналогичный эффект воздействия цинка наблюдался у *B. juncea* и в отношении размеров листовой поверхности: концентрации металла 50 мг/кг и выше приводили к снижению площади листьев (табл. 2), что наиболее ярко проявилось при наибольшей концентрации цинка. В частности, площадь 1-го настоящего листа у растений этого варианта опыта оказалась в 4 раза меньше, чем в контроле. У *S. alba* отрицательный эффект отмечен лишь при использовании цинка в концентрациях 100 мг/кг субстрата и выше. При использовании металла в концентрации 200 мг/кг субстрата площадь листа была в 3 раза меньше, чем в контроле. Необходимо также отметить, что концентрации цинка 25 и 50 мг/кг субстрата оказывали стимулирующий эффект на формирование листовой

пластинки у растений этого вида, чего не наблюдалось у *B. juncea*.

Отрицательное воздействие цинка в высоких концентрациях на размеры листьев показано ранее [Misra et al., 2005; Durand et al., 2010]. Предполагают, что основными причинами подобного эффекта являются: торможение цинком деления клеток меристемы листа, его отрицательное влияние на растяжение и деление клеток мезофилла, а также на основные физиологические процессы [Stiborova et al., 1986; Veselov et al., 2003; Khudsar et al., 2004].

Токсическое действие тяжелых металлов на растения проявляется и в значительном снижении их продуктивности. При этом изменения в накоплении биомассы надземных и подземных органов в их присутствии служат одним из критериев металлоустойчивости разных видов (сортов) [Bingham et al., 1975; Cook et al., 1997]. На снижение в присутствии избытка цинка биомассы растений изученных нами видов уже указывалось. Так, в условиях гидропонной культуры цинк в концентрации 65 мг/л приводил к снижению сухой надземной биомассы *B. juncea* [Chatterjee, Khurana, 2007]. При выращивании растений этого же вида на субстрате (перлит) уже концентрация металла 50 мкМ приводила к почти 50% снижению сырой и сухой биомассы побега [Feigl et al., 2016]. В опыте с почвенной культурой концентрации цинка 400 [Zalewska, Nogalska, 2014] и 1000 [Soleimannejad et al., 2020] мг/кг почвы вызывали снижение сухой биомассы побега *S. alba*, тогда как металл в концентрации 200 мг/кг почвы, напротив, приводил к ее увеличению [Zalewska, Nogalska, 2014].

Таблица 1. Влияние избытка цинка на высоту побега *S. alba* с. Радуга и *B. juncea* с. Славянка

Table 1. Effect of zinc excess on shoot height of *S. alba* cv. Raduga and *B. juncea* cv. Slavyanka

Вид растения Plant species	Концентрация цинка, мг/кг субстрата Zn concentration, mg/kg substrate					
	5	25	50	100	150	200
<i>S. alba</i>	11,89 ± 0,80	14,55 ± 0,63*	11,81 ± 0,66	7,55 ± 0,84*	5,80 ± 0,45*	6,81 ± 0,28*
<i>B. juncea</i>	15,24 ± 0,87	13,33 ± 1,00	12,38 ± 0,56*	11,06 ± 0,68*	7,51 ± 0,86*	6,94 ± 1,08*

Таблица 2. Влияние избытка цинка на площадь (см³) первых настоящих листьев *S. alba* с. Радуга и *B. juncea* с. Славянка

Table 2. Effect of zinc excess on the first true leaves area (cm³) of *S. alba* cv. Raduga and *B. juncea* cv. Slavyanka

Вид растения Plant species	Концентрация цинка, мг/кг субстрата Zn concentration, mg/kg substrate					
	5	25	50	100	150	200
<i>S. alba</i>	4,0 ± 0,61	6,17 ± 0,78*	5,70 ± 0,17*	2,70 ± 0,55*	1,99 ± 0,48*	1,27 ± 0,12*
<i>B. juncea</i>	4,09 ± 0,34	3,39 ± 0,36	3,13 ± 0,22*	1,77 ± 0,22*	1,35 ± 0,20*	1,02 ± 0,30*

Таблица 3. Влияние избытка цинка на сухую биомассу (мг) побега *S. alba* с. Радуга и *B. juncea* с. Славянка

Table 3. Effect of zinc excess on shoot dry weight (mg) of *S. alba* cv. Raduga and *B. juncea* cv. Slavyanka

Вид растения Plant species	Концентрация цинка, мг/кг субстрата Zn concentration, mg/kg substrate					
	5	25	50	100	150	200
<i>S. alba</i>	33,70 ± 4,70	58,83 ± 5,86*	53,59 ± 8,59*	30,05 ± 6,06*	36,21 ± 3,29*	33,81 ± 2,28*
<i>B. juncea</i>	28,55 ± 2,37	24,02 ± 2,37	18,64 ± 1,36*	14,68 ± 1,67*	14,57 ± 1,69*	10,84 ± 2,15*

В наших опытах у *S. alba* при воздействии цинка в концентрациях 25 и 50 мг/кг субстрата несколько возрастали (по сравнению с контролем) сырая и сухая биомасса побега (рис.; табл. 3). При этом в большей степени стимулирующий эффект металла наблюдался при использовании концентрации 25 мг/кг субстрата. Высокие концентрации цинка (100 мг/кг и выше) ингибировали накопление сырой биомассы растениями, однако сухая биомасса при этом практически не отличалась от контроля, что свидетельствует о сохранении необходимого уровня фотосинтетической активности в этих условиях. В отличие от этого у *B. juncea* стимулирующего воздействия цинка на биомассу побега не обнаружено (рис.; табл. 3). Металл в концентрации 25 мг/кг субстрата не влиял на изученные показатели, а его более высокие концентрации (50 мг/кг субстрата и выше) приводили к снижению сырой и сухой биомассы побега в соответствии с концентрационной зависимостью.

В целом оба изученных представителя семейства *Brassicaceae* способны произрастать при относительно высоких концентрациях цинка в корнеобитаемой среде. При этом влияние металла на рост растений зависит как от его концентрации в субстрате, так и от вида растения. У *S. alba*, который не является гипераккумулятором цинка, металл в концентрации 25 мг/кг субстрата приводил к увеличению (по сравнению с контролем) всех изученных показателей роста, что, очевидно, объясняется его необходимостью для жизнедеятельности растений. Отрицательный же эффект металла в отношении большинства ростовых показателей проявлялся лишь при использовании цинка в концентрациях 100 мг/кг субстрата и выше. При этом сухая биомасса побега сохранялась на уровне контроля даже в присутствии металла в концентрации 200 мг/кг субстрата. У *B. juncea* – вида, способного к сверхнакоплению цинка, стимулирующего воздействия металла в изученных концентрациях не наблюдалось, а снижение (по отношению к контролю)

всех показателей роста побега отмечалось уже при концентрации металла 50 мг/кг субстрата, достигая максимальных значений при наиболее высокой концентрации металла. Более сильное ингибирование роста побега у *B. juncea* по сравнению с *S. alba*, вероятно, связано с более высокой концентрацией металла в надземных органах растений, что характерно для гипераккумуляторов [Sridhar et al., 2005; Adediran et al., 2015; Chaudhry et al., 2020].

Заключение

Полученные в данной работе результаты доказывают способность *S. alba* и *B. juncea* произрастать при довольно высоких концентрациях цинка в корнеобитаемой среде. Это предполагает возможность их использования в фиторемедиации (фитостабилизации и фитоэкстракции) загрязненных цинком территорий.

Литература

- Казнина Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Roaseae* к тяжелым металлам: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2016. 48 с.
- Прасад М. Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 5. С. 768–780.
- Проценко Е. П., Неведров Н. П. Способность к фитоэкстракции цинка горчицей сарептской *Brassica juncea* (L.) при разных уровнях загрязнения черноземной и серой лесной почвы // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2013. № 1(25). Р. 264–268.
- Радионон В. В., Волков К. С., Холодова В. П. Сравнительный анализ устойчивости растений рапса к повышенным концентрациям меди и цинка // Вестник РУДН. 2007. № 4. С. 21–30.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: Учебное пособие / Институт биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 77 с.
- Adediran G. A., Ngwenya B. T., Frederick J., Mosselmans W., Heal K. V., Harvie B. A. Mechanisms

behind bacteria induced plant growth promotion and Zn accumulation in *Brassica juncea* // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 283. P. 490–499. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.064

Bingham F. T., Page A. L., Mahler R. J., Ganje T. J. Growth and cadmium accumulation of plants growth on a soil treated with cadmium enriched sludge // *J. Environ. Qual.* 1975. Vol. 4, no. 2. P. 207–211.

Charles D. J. Mustard // *Antioxidant properties of Science, herbs and other sources*. NY: Springer Science+Business Media, 2013. P. 401–408. doi: 10.1007/978-1-4614-4310-0

Chatterjee C., Khurana N. Zinc stress-induced changes in biochemical parameters and oil content of mustard // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2007. Vol. 38. P. 751–761. doi: 10.1080/00103620701220718

Chaudhry H., Nisar N., Mehmood S., Iqbal M., Nazir A., Yasir M. Indian mustard *Brassica juncea* efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil // *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2020. Vol. 23. Art. 101489. doi: 10.1016/j.bcab.2019.101489

Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // *Biochimie*. 2006. Vol. 88. P. 1707–1719. doi: 10.1016/j.biochi.2006.07.003

Cook C. M., Kostidou A., Vardaka E., Lanaras T. Effect of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of *Phaseolus* plants // *Photosynthetica*. 1997. Vol. 34, no. 2. P. 179–193.

Durand T. C., Hausman J. F., Carpin S. Zinc and cadmium effects on growth and ion distribution in *Populus tremula* × *Populus alba* // *Biol. Plant.* 2010. Vol. 54, no. 1. P. 191–194. doi: 10.1007/s10535-010-0033-z

Fargasova A. Phytotoxic effect of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots // *Biol. Plant.* 2001. Vol. 3. P. 471–473. doi: 10.1023/A:1012456507827

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 // *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2016. Vol. 125. P. 141–152. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.006

Grotz N., Guerinot M. L. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants // *Biochim. Biophys. Acta*. 2006. Vol. 1763. P. 595–608. doi: 10.1016/j.bbamcr.2006.05.014

Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M., Sairam R. K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua* // *Biol. Plant.* 2004. Vol. 48, no. 2. P. 255–260. doi: 10.1023/B:BIOP.0000033453.24705.f5

Misra A., Srivastava A. K., Srivastava N. K., Khan A. Zn-acquisition and its role in growth, photosynthesis, photosynthetic pigments, and biochemical changes in essential monoterpene oil(s) of *Pelargonium graveolens* // *Photosynthetica*. 2005. Vol. 43. P. 153–155. doi: 10.1007/s11099-005-3155-3

Mourato M. P., Moreira I. N., Leitão I., Pinto F. R., Sales J. R., Martins L. L. Effect of heavy metals in plants

of the genus *Brassica* // *Int. J. Mol. Sci.* 2015. Vol. 16. Art. 17975–17998. doi: 10.3390/ijms160817975

Sinclair S. A., Krämer U. The zinc homeostasis network of land plants // *Biochem. Biophys. Acta*. 2012. Vol. 1823. P. 1553–1567. doi: 10.1016/j.bbamcr.2012.05.016

Soleimannejad Z., Sadeghipour H. R., Abdolzadeh A., Golalipour M. Physiological responses of white mustard grown in Zn-contaminated soils // *Acta Physiol. Plant.* 2020. Vol. 42. P. 131. doi: 10.1007/s11738-020-03119-8

Sridhar B. B. M., Diehl S. V., Han F. X., Monts D. L., Su Y. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea* (L.)) // *Environ. Expt. Bot.* 2005. Vol. 54. P. 131–141. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.06.011

Stiborova M., Doubravova M., Brezinova A., Friedrich A. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis barley (*Hordeum vulgare* L.) // *Photosynthetica*. 1986. Vol. 20, no. 4. P. 418–425.

Veselov D., Kudoyarova G., Symonyan M., Veselov St. Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings // *Bulg. J. Plant Physiol.* 2003. Spec. iss. P. 353–359.

Zalewska M., Nogalska A. Phytoextraction potential of sunflower and white mustard plants in zinc-contaminated soil // *Chilean J. Agric. Res.* 2014. Vol. 74, no. 4. P. 485–489. doi: 10.4067/S0718-58392014000400016

Zhang Y., Gladyshev V. N. Comparative genomics of trace element dependence in biology // *J. Biol. Chem.* 2011. Vol. 286. P. 23623–23629. doi: 10.1074/jbc.R110.172833

References

Adediran G. A., Ngwenya B. T., Frederick J., Mosselems W., Heal K. V., Harvie B. A. Mechanisms behind bacteria induced plant growth promotion and Zn accumulation in *Brassica juncea*. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;283:490–499. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.064

Bingham F. T., Page A. L., Mahler R. J., Ganje T. J. Growth and cadmium accumulation of plants growth on a soil treated with cadmium enriched sludge. *J. Environ. Qual.* 1975;4(2):207–211.

Charles D. J. Mustard. *Antioxidant properties of Science, herbs and other sources*. NY: Springer Science+Business Media; 2013. P. 401–408. doi: 10.1007/978-1-4614-4310-0

Chatterjee C., Khurana N. Zinc stress-induced changes in biochemical parameters and oil content of mustard. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2007;38:751–761. doi: 10.1080/00103620701220718

Chaudhry H., Nisar N., Mehmood S., Iqbal M., Nazir A., Yasir M. Indian mustard *Brassica juncea* efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2020;23:101489. doi: 10.1016/j.bcab.2019.101489

Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants.

Biochimie. 2006;88:1707–1719. doi: 10.1016/j.biochi.2006.07.003

Cook C. M., Kostidou A., Vardaka E., Lanaras T. Effect of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of *Phaseolus* plants. *Photosynthetica*. 1997;34(2):179–193.

Durand T. C., Hausman J. F., Carpin S. Zinc and cadmium effects on growth and ion distribution in *Populus tremula* × *Populus alba*. *Biol. Plant*. 2010; 54(1):191–194. doi: 10.1007/s10535-010-0033-z

Fargasova A. Phytotoxic Effect of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots. *Biol. Plant*. 2001;3:471–473. doi: 10.1023/A:1012456507827

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. *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2016;125:141–152. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.006

Grotz N., Guerinot M. L. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochim. Biophys. Acta*. 2006;1763:595–608. doi: 10.1016/j.bbamcr.2006.05.014

Kaznina N. M. Physiological-biochemical and molecular genetic mechanisms of the *Poaceae* family resistance to heavy metals: Summary DSc (Dr. of Biol.) thesis. St. Petersburg; 2016. 48 p. (In Russ.)

Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M., Sairam R. K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biol. Plant*. 2004;48(2):255–260. doi: 10.1023/B:BIOP.0000033453.24705.f5

Misra A., Srivastava A. K., Srivastava N. K., Khan A. Zn-acquisition and its role in growth, photosynthesis, photosynthetic pigments, and biochemical changes in essential monoterpene oil(s) of *Pelargonium graveolens*. *Photosynthetica*. 2005;43:153–155. doi: 10.1007/s11099-005-3155-3

Mourato M. P., Moreira I. N., Leitão I., Pinto F. R., Sales J. R., Martins L. L. Effect of heavy metals in plants of the genus *Brassica*. *Int. J. Mol. Sci*. 2015;16:17975–17998. doi: 10.3390/ijms160817975

Prasad M. N. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: Hype for commercialization. *Fiziologiya*

rastenii = *Russian Journal of Plant Physiology*. 2003;50(5):768–780. (In Russ.)

Protsenko E. P., Nevedrov N. P. Zinc phytoextraction ability of the brown mustard *Brassica juncea* (L.) at different levels of contamination of chernozem and grey forest soil. *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings. The Online Academic Journal of Kursk State University*. 2013;1(25):264–268. (In Russ.)

Radionov N. V., Volkov K. S., Holodova V. P. Comparative analysis of oilseed rape plant tolerance to excessive copper and zinc concentrations. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2007;4:21–30. (In Russ.)

Soleimannejad Z., Sadeghipour H. R., Abdolzahdeh A., Golalipour M. Physiological responses of white mustard grown in Zn-contaminated soils. *Acta Physiol. Plant*. 2020;42:131. doi: 10.1007/s11738-020-03119-8

Sinclair S. A., Krämer U. The zinc homeostasis network of land plants. *Biochem. Biophys. Acta*. 2012;1823:1553–1567. doi: 10.1016/j.bbamcr.2012.05.016

Sridhar B. B. M., Diehl S. V., Han F. X., Monts D. L., Su Y. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea* (L.)). *Environ. Expt. Bot*. 2005;54:131–141. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.06.011

Stiborova M., Doubravova M., Brezinova A., Friedrich A. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis barley (*Hordeum vulgare* L.). *Photosynthetica*. 1986;20(4):418–425.

Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M. Physiological basis of plant resistance to heavy metals: A textbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 77 p. (In Russ.)

Veselov D., Kudoyarova G., Symonyan M., Veselov St. Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Bulg. J. Plant Physiol*. 2003. Spec. iss. P. 353–359.

Zalewska M., Nogalska A. Phytoextraction potential of sunflower and white mustard plants in zinc-contaminated soil. *Chilean J. Agric. Res*. 2014;74(4):485–489. doi: 10.4067/S0718-58392014000400016

Zhang Y., Gladyshev V. N. Comparative genomics of trace element dependence in biology. *J. Biol. Chem*. 2011;286:23623–23629. doi: 10.1074/jbc.R110.172833

Поступила в редакцию / received: 07.07.2022; принята к публикации / accepted: 16.08.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Репкина Наталья Сергеевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: nrt9@ya.ru

Нилова Ирина Александровна

канд. биол. наук, научный сотрудник

e-mail: im-ira@mail.ru

Казнина Наталья Мстиславовна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Repkina, Natal'ya

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Nilova, Irina

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Kaznina, Natal'ya

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher