

УДК 581.1

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ГОРЧИЦЫ САРЕПТСКОЙ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ И ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ ИЗБЫТКА ЦИНКА И НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Е. С. Холопцева*, Н. М. Казнина, Ю. В. Батова, А. Ф. Титов

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

В лабораторных условиях изучали показатели роста, состояния фотосинтетического аппарата и водного обмена у растений горчицы сарептской (*Brassica juncea* L.) сорта Ника при раздельном и одновременном действии избытка цинка (1000 мкМ) и низкой температуры (4 °С). Обнаружено, что на рост растений и активность фотосинтетического аппарата в большей степени влияет избыток цинка, тогда как на показатели водного обмена – низкая температура. Так, в условиях действия избытка цинка при 12-кратном увеличении его содержания в надземных органах у растений тормозился рост побега, уменьшались содержание фотосинтетических пигментов и оводненность тканей листа, замедлялась скорость фотосинтеза. В условиях гипотермии, но при оптимальном содержании цинка растения оказались способными поддерживать необходимую скорость фотосинтеза, сохраняя количество фотосинтетических пигментов и оводненность тканей листа на уровне контроля или даже выше. Но при этом заметно снижалась интенсивность транспирации и возрастала фотосинтетическая эффективность использования воды (WUE). При одновременном действии стресс-факторов синергетического эффекта в отношении показателей роста и фотосинтеза не отмечено: степень ингибирования роста побега и накопления его биомассы (по сравнению с оптимальными условиями роста), а также скорости фотосинтеза была практически такой же, как и при действии только избытка цинка. При этом содержание металла в растениях этого варианта опыта оказалось ниже, чем в варианте с избытком цинка и оптимальной температурой. Усиление отрицательного эффекта при одновременном воздействии двух стресс-факторов по сравнению с действием каждого из них по отдельности проявилось только в отношении интенсивности транспирации. Сделан вывод о высокой устойчивости горчицы сарептской не только к избытку цинка, но и к низкой температуре и их одновременному действию, которая обеспечивается, по крайней мере отчасти, адаптационными изменениями ФСА и в водном обмене. Результаты исследований показывают возможность и перспективность использования горчицы сарептской сорта Ника в фиторемедиации загрязненных цинком территорий, в том числе северных.

Ключевые слова: *Brassica juncea* L.; цинк; низкая положительная температура; рост; фотосинтез; водный обмен

Для цитирования: Холопцева Е. С., Казнина Н. М., Батова Ю. В., Титов А. Ф. Физиолого-биохимические показатели растений горчицы сарептской при раздельном и одновременном действии избытка цинка и низкой температуры // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 3. С. 32–42. doi: 10.17076/eb2079

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0004).

E. S. Kholoptseva*, N. M. Kaznina, Yu. V. Batova, A. F. Titov. PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF SAREPTA MUSTARD PLANTS UNDER SEPARATE AND SIMULTANEOUS ACTION OF ZINC SURPLUS AND LOW TEMPERATURE

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

The effect of separate and simultaneous action of zinc surplus (1000 μM) and low temperature (4 $^{\circ}\text{C}$) on growth parameters, photosynthetic apparatus and water exchange in *Brassica juncea* L. cv. Nika was studied in laboratory settings. Zinc surplus proved to have a greater effect on plant growth and photosynthetic apparatus activity, while low temperature had a greater effect on water exchange indices. To wit, where zinc was in surplus, its content in aboveground organs increased 12-fold, thereby shoot growth was inhibited, photosynthetic pigment content and water content of leaf tissues decreased, photosynthesis rate slowed down. When exposed to hypothermia but with optimal zinc availability, the plants were able to maintain the required photosynthesis rate, with photosynthetic pigments and leaf tissue water content remaining at the control level or even higher. However, the transpiration rate decreased significantly (compared to optimal growth conditions) and the photosynthetic water use efficiency (WUE) increased. No synergistic effect on growth and photosynthesis parameters was observed under simultaneous exposure to these stress factors: the inhibition of shoot height and shoot weight (compared to optimal growth conditions) as well as the photosynthesis rate was nearly the same as under the action of zinc surplus alone. At the same time, the metal content in plants in this treatment was lower than in the variant with zinc surplus and optimal temperature. The only index affected more severely by the simultaneous action of the two stress factors compared to exposure to each of them separately was the transpiration rate. We conclude that *Sarepta mustard* is highly resistant to both zinc surplus and low temperature as well as to their simultaneous action, which is due, at least in part, to adaptive changes in the photosynthetic apparatus and water exchange. The results of the study demonstrate the practicality of using *Sarepta mustard* cv. Nika in phytoremediation of zinc-contaminated areas, including in northern regions.

Keywords: *Brassica juncea* L.; zinc; low positive temperature; growth; photosynthesis; water exchange

For citation: Kholoptseva E. S., Kaznina N. M., Batova Yu. V., Titov A. F. Physiological and biochemical parameters of *Sarepta mustard* plants under separate and simultaneous action of zinc surplus and low temperature. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 3. P. 32–42. doi: 10.17076/eb2079

Funding. The study was funded from Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN-2022-0004).

Введение

Наблюдаемое в последние десятилетия значительное повышение содержания цинка в почве сельскохозяйственных земель во многих регионах становится все более острой проблемой.

Чаще всего основной причиной этого является многолетнее бесконтрольное внесение высоких доз цинксодержащих минеральных удобрений и средств защиты растений от болезней и вредителей [Singh et al., 2017]. Несмотря на то что цинк является необходимым микроэлементом

для растений, в высоких концентрациях он отрицательно сказывается на их жизнедеятельности. В частности, у них тормозится рост и развитие, замедляются фотосинтез и дыхание, нарушается водный обмен, что приводит к снижению продуктивности и, как следствие, к значительным потерям урожая [Mahmoudi et al., 2021; Li et al., 2022; Moustakas et al., 2022]. Кроме того, накапливаясь в больших количествах в органах растений, цинк представляет серьезную опасность для здоровья животных и человека [Chasapis et al., 2020; Moreira et al., 2021].

Одним из перспективных и экономически наиболее эффективных способов снижения содержания цинка в почве считается технология фиторемедиации. Но для ее успешного применения необходим тщательный подбор видов (экотипов, сортов) растений, не только устойчивых к данному металлу, но и способных транспортировать его в надземные органы для последующей утилизации [Balafrej et al., 2020; Pasricha et al., 2021; Холопцева, Казнина, 2023; Repkina et al., 2023]. К таким видам относятся целый ряд представителей семейства *Brassicaceae*, которые успешно произрастают на почвах с высоким содержанием цинка [Marchiol et al., 2004]. Среди них наиболее известным видом является горчица сарептская (*Brassica juncea*), которая способна накапливать в больших количествах различные тяжелые металлы, включая цинк. Это в дополнение к быстрому росту и большой биомассе делает ее перспективной культурой для фиторемедиации территорий, загрязненных металлами [Duquene et al., 2009; Das et al., 2011; Bortoloti, Baron, 2022]. Однако следует иметь в виду, что успешное использование указанной технологии в северных регионах затруднено из-за частых понижений температуры до низких положительных, а иногда и до отрицательных значений в период активной вегетации растений [Ljubej et al., 2021b; Xu et al., 2022]. Поэтому при выборе конкретных видов растений для фиторемедиации почв в этих условиях необходимы данные об их холодоустойчивости. Сведений же о способности растений *Brassica juncea* переносить холод в исследованной нами литературе нет. Хотя известно, что другие представители этого семейства, такие как, например, *Brassica napus* [Yan et al., 2019] и *Brassica oleracea* [Šamec et al., 2022], способны успешно адаптироваться к кратковременным понижениям температуры в течение вегетационного сезона.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы явилось изучение ряда физиологических показателей и процессов у горчицы

сарептской, испытывающей раздельное или одновременное воздействие на нее избытка цинка и низкой температуры.

Материалы и методы

Исследования проводили на растениях горчицы сарептской (*Brassica juncea* L.) сорта Ника. Семена для исследования получены из Отдела генетических ресурсов масличных и прядильных культур ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова». Их замачивали в течение 3 сут в дистиллированной воде, после чего помещали в сосуды объемом 350 мл с питательным раствором Хогланда – Арнона в количестве 50 шт. на 1 сосуд и выращивали под светоустановкой при температуре 22 °C, относительной влажности воздуха 60–70 %, ФАР 200 мкмоль/(м² · с), 14-часовом фотопериоде. Через 7 сут одну часть растений оставляли на питательном растворе Хогланда – Арнона, содержащем 5 мкМ цинка в форме сульфата (ZnSO₄ × 7H₂O), а остальные растения переносили на раствор с содержанием металла 1000 мкМ. Спустя еще 7 сут половину растений обоих вариантов подвергали 7-суточному воздействию температуры 4 °C (варианты Zn5 + 4 °C и Zn1000 + 4 °C), а другую оставляли при оптимальной (22 °C) температуре (контроль Zn5, 22 °C и вариант Zn1000, 22 °C).

О воздействии избытка цинка и/или низкой температуры на растения судили по ряду ростовых показателей (высота побега, его сухая биомасса), активности фотосинтетического аппарата (ФСА) (содержание фотосинтетических пигментов, квантовая эффективность фотосистемы II (ФСII), скорость фотосинтеза) и водного обмена (интенсивность транспирации, фотосинтетическая эффективность использования воды, оводненность тканей побега). Помимо этого, определяли содержание цинка в побегах и корнях.

Сухую биомассу побегов определяли после высушивания при 105 °C до постоянного веса. Для определения содержания пигментов навеску листьев растирали и экстрагировали пигменты 98%-м ацетоном. Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли на спектрофотометре (СФ-2000, Россия), рассчитывая по известным формулам [Lichtenthaler, Wellburn, 1983]. Долю хлорофиллов в свето-собирающем комплексе (ССК) устанавливали в % исходя из того, что весь хлорофилл *b* находится в ССК, а соотношение хлорофиллов *a/b* составляет 1,2 [Lichtenthaler, 1987]. Потенциальный квантовый выход фотохимической

активности ФЦИ (F_v/F_m) определяли после 20-минутной темновой адаптации листьев [Maxwell, Johnson, 2000] с использованием MINI-PAM (Walz, Германия). Интенсивность фотосинтеза и транспирации измеряли с помощью портативной системы для исследования CO_2 -газообмена и водяных паров (HSM-1000, Германия). Фотосинтетическую эффективность использования воды (WUE) рассчитывали как отношение величины видимого фотосинтеза к интенсивности транспирации растений [Tambussi et al., 2007]. Содержание цинка в побегах и корнях определяли ICP-MS методом с использованием масс-спектрометра с индуцированной плазмой (Thermo Fisher Scientific, Германия) по стандартной методике [Светов и др., 2015]. Высушенные при 105° пробы побегов и корней растений измельчали и переносили в автоклав, где подвергали обработке смесью концентрированных азотной (HNO_3) и соляной (HCl) кислот. Далее пробы нагревали в установке микроволнового разложения Speedwave Xpert и доводили до нужного объема добавлением деионизированной воды. Погрешность измерений рассчитывали по формулам согласно [Методика..., 2002].

При измерении показателей роста биологическая повторность в пределах одного варианта опыта составляла 10 растений, при измерении параметров активности ФСА и водного обмена – 5–10 растений в зависимости от показателя. Аналитическая повторность 3–5-кратная. При определении содержания цинка брали смешанную пробу из 10 растений каждого варианта опыта, аналитическая повторность 2-кратная. Весь опыт повторяли дважды. В таблицах и на графиках представлены средние значения по результатам двух опытов и их стандартные ошибки. Статистическую

обработку данных осуществляли с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2007. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании ЦКП НО ИБ КарНЦ РАН «Комплексные фундаментальные и прикладные исследования особенностей функционирования живых систем в условиях Севера».

Результаты

Проведенные исследования показали, что при раздельном действии на растения избытка цинка в корнеобитаемой среде или низкой температуры, а также при их одновременном воздействии замедляется рост побега (табл. 1). При этом уменьшение более чем вдвое (по сравнению с оптимальными условиями роста) высоты побега и его сухой биомассы наблюдали в варианте с избытком цинка (Zn1000, 22°C) и при совместном действии этих стресс-факторов (Zn1000 + 4°C). При действии низкой температуры в оптимальных условиях минерального питания (Zn5 + 4°C) степень ингибирования указанных показателей была менее выраженной, чем в варианте Zn1000, 22°C .

Помимо роста цинк в высокой концентрации вызывал замедление (на 25 % по сравнению с оптимальными условиями роста) скорости фотосинтеза, что наблюдалось в варианте с избытком металла (Zn1000 + 22°C) и его одновременном действии с низкой температурой (Zn1000 + 4°C). Важно отметить, что при воздействии температуры 4°C (Zn5 + 4°C) растения оказались способными поддерживать скорость процесса на уровне растений, находящихся в оптимальных условиях роста (рис. 1).

Таблица 1. Ростовые показатели растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4°C) и при их одновременном действии

Table 1. Growth indicators of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μM), low temperature (4°C) and their simultaneous action

Показатель Indicator	Варианты опыта Variants			
	контроль control	Zn1000, 22°C	Zn5 + 4°C	Zn1000 + 4°C
Высота побега, см Shoot height, cm	15,57 $\pm$ 0,29a	6,58 $\pm$ 0,16c	10,03 $\pm$ 0,18b	6,72 $\pm$ 0,09c
Сухая биомасса побега, мг Shoot dry weight, mg	55,00 $\pm$ 4,00a	16,80 $\pm$ 1,40c	22,00 $\pm$ 1,00b	16,60 $\pm$ 0,9c

Примечание. Здесь и в табл. 2, а также на рисунках разными латинскими буквами обозначены статистически значимые различия между средними значениями конкретного показателя в разных вариантах опыта при $p < 0,05$.

Note. Here and in table 2, and in figures, different letters indicate statistically significant differences between the average values of a specific indicator in different experimental variants at $p < 0.05$.

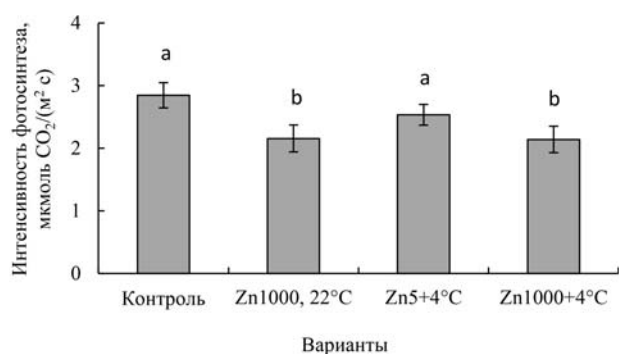


Рис. 1. Интенсивность фотосинтеза растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Fig. 1. Intensity of photosynthesis of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μM), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Интенсивность фотосинтетических процессов в стрессовых условиях, как известно, во многом зависит от содержания фотосинтетических пигментов [Гавриленко, Жигалова, 2005]. В наших исследованиях обнаружено, что при действии избытка цинка (Zn1000 + 22 °C) содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений заметно снижалось по сравнению с контролем (табл. 2). Однако

соотношение хлорофиллов *a* и *b*, а также их содержание в ССК оставалось на уровне контрольных значений. При действии температуры 4 °C в оптимальных условиях минерального питания (Zn5 + 4 °C) содержание пигментов сохранялось практически неизменным, но наблюдалось некоторое увеличение соотношения хлорофиллов *a/b* и уменьшение количества хлорофиллов в ССК. При одновременном действии двух стресс-факторов (Zn1000 + 4 °C) все изученные показатели были на уровне растений, не испытывающих стрессовое воздействие.

В отличие от пигментов значение *Fv/Fm* при действии всех видов стрессового воздействия несколько увеличивалось по сравнению с оптимальными условиями роста, а в варианте с одновременным воздействием двух стрессоров оказалось наиболее высоким (табл. 2).

В ходе исследований также обнаружено, что интенсивность транспирации в большей степени зависела от температуры. В частности, если в присутствии только избытка цинка (Zn1000, 22 °C) скорость процесса снижалась на 17 % по сравнению с оптимальными условиями роста, то в условиях гипотермии (Zn5 + 4 °C) – на 42 % (рис. 2). Совместное же воздействие стресс-факторов (Zn1000 + 4 °C) приводило к замедлению скорости транспирации более чем в 2 раза.

Таблица 2. Содержание пигментов и потенциальный квантовый выход фотохимической активности ФСII в листьях растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Table 2. Pigment content and potential quantum yield of photochemical activity of PSII in the leaves of *Brassica juncea* cv. Nika under conditions of zinc excess (1000 μM), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Показатель Indicator	Варианты опыта Variants			
	контроль control	Zn1000, 22 °C	Zn5 + 4 °C	Zn1000 + 4 °C
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сырой массы Chlorophyll <i>a</i> content, mg/g wet weight	0,45 ± 0,01a	0,32 ± 0,008b	0,47 ± 0,006a	0,42 ± 0,02a
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сырой массы Chlorophyll <i>b</i> content, mg/g wet weight	0,21 ± 0,009a	0,16 ± 0,007b	0,20 ± 0,005a	0,20 ± 0,009a
Содержание хлорофиллов (<i>a+b</i>), мг/г сырой массы Chlorophyll (<i>a+b</i>) content, mg/g wet weight	0,66 ± 0,023ab	0,48 ± 0,014c	0,68 ± 0,010a	0,61 ± 0,027b
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы Carotenoid content, mg/g wet weight	0,13 ± 0,004a	0,11 ± 0,003b	0,13 ± 0,003a	0,13 ± 0,005a
Соотношение хлорофиллов <i>a/b</i> Chlorophyll ratio <i>a/b</i>	2,17 ± 0,04b	2,07 ± 0,05b	2,38 ± 0,047a	2,18 ± 0,06b
Содержание хлорофиллов в ССК, % Chlorophyll content in the SSC	69,65 ± 1,12a	71,91 ± 1,14a	65,35 ± 0,89b	69,57 ± 1,31a
<i>Fv/Fm</i> потенциальный квантовый выход фотохимической активности ФСII <i>Fv/Fm</i> Potential quantum yield of photochemical activity of PSII	0,759 ± 0,002c	0,769 ± 0,003b	0,797 ± 0,003a	0,809 ± 0,003a

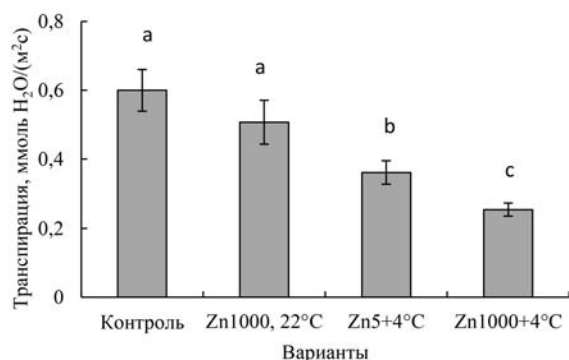


Рис. 2. Интенсивность транспирации растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Fig. 2. Transpiration rate of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μ M), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

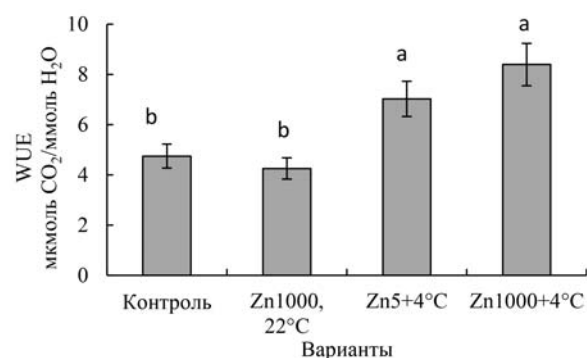


Рис. 3. Эффективность использования воды (WUE) растениями *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Fig. 3. Water use efficiency (WUE) of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μ M), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Уменьшение интенсивности транспирации в условиях действия низкой температуры приводило к значительному повышению значений WUE у растений этих вариантов опыта (Zn5 + 4 °C и Zn1000 + 4 °C) (рис. 3). Избыток цинка в оптимальных температурных условиях (Zn1000, 22 °C) не оказывал сколько-нибудь заметного влияния на этот показатель.

Замедление скорости транспирации и повышение эффективности использования воды позволило растениям в условиях гипотермии и при оптимальном уровне цинка сохранить оводненность тканей листьев на уровне контроля (рис. 4). В отличие от этого в условиях избытка цинка (Zn1000, 22 °C), а также при одновременном воздействии двух стресс-факторов (Zn1000 + 4 °C) она оказалась меньше контрольных значений.

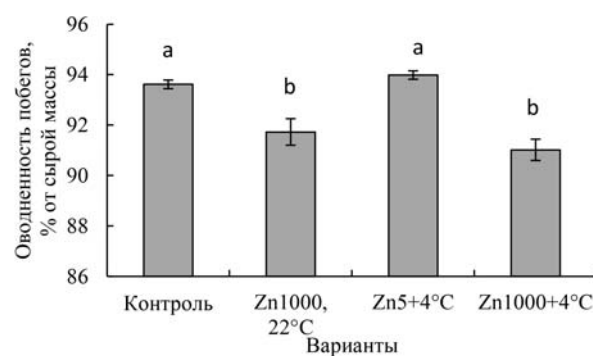


Рис. 4. Оводненность побегов растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Fig. 4. Water content of shoots of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μ M), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Таблица 3. Содержание цинка в растениях *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Table 3. Zinc content of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μ M), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Показатель Indicator	Варианты опыта Variants			
	контроль control	Zn1000, 22 °C	Zn5 + 4 °C	Zn1000 + 4 °C
Содержание Zn в побеге, мг/кг сухого веса Zn content in shoot, mg/kg dry weight	357 ± 34	4384 ± 356*	326 ± 32	3005 ± 246*
Содержание Zn в корне, мг/кг сухого веса Zn content in root, mg/kg dry weight	2812 ± 230	22721 ± 1823*	1145 ± 97*	18553 ± 1490*

Примечание. * Различия с контролем достоверны при $p < 0,05$.

Note. * Differences with the control are significant at $p < 0.05$.

Проведенный химический анализ выявил самое высокое содержание цинка в побеге и корне в варианте Zn1000, 22 °C, которое превышало значение этого показателя у растений в оптимальных условиях роста (Zn5, 22 °C) в 12 раз (табл. 3). Воздействие только низкой температуры (Zn5 + 4 °C) не сказывалось на содержании металла в побеге, но значительно снижало его количество в корне. При одновременном воздействии 4 °C с избытком цинка (Zn1000 + 4 °C) содержание металла возрастало и в надземной массе и в корне (по сравнению с оптимальным уровнем металла), хотя и в меньшей степени, чем при оптимальной температуре (Zn1000, 22 °C).

Обсуждение

Способность растений горчицы сарептской переносить без отрицательных последствий действие высоких концентраций цинка хорошо известна [Marchiol et al., 2004; Balafrej et al., 2020]. Однако большинство имеющихся на сегодняшний день сведений о высокой металлоустойчивости этого вида основываются

на опытах, проведенных при оптимальных температурах. Нами изучено влияние избытка цинка в корнеобитаемой среде на ряд физиолого-биохимических показателей и процессов у растений данного вида при одновременном действии избытка цинка и низкой температуры.

В ходе исследований обнаружено, что оба стресс-фактора как при раздельном, так и при одновременном действии отрицательно сказываются на росте побега у горчицы сарептской (табл. 1, 4). При этом цинк оказывал более сильное отрицательное воздействие на этот процесс, чем низкая температура, что, вероятно, являлось следствием непосредственного воздействия ионов металла на клеточное деление и растяжение, а также нарушения водного режима. В большей степени избыток металла влиял и на ФСА растений, в частности, приводя к уменьшению содержания пигментов и замедлению скорости фотосинтеза. Помимо этого наблюдалось снижение оводненности тканей листа (рис. 4).

Относительно влияния высоких концентраций цинка на ФСА растений семейства Brassicaceae сведения противоречивы. Так, у *B. napus*

Таблица 4. Показатели роста, ФСА и водного обмена растений *Brassica juncea* с. Ника в условиях избытка цинка (1000 мкМ), низкой температуры (4 °C) и при их одновременном действии

Table 4. Growth indices, photosynthetic activity and water exchange of *Brassica juncea* cv. Nika plants under conditions of zinc excess (1000 μM), low temperature (4 °C) and their simultaneous action

Эффект Effect	Варианты опыта Variants		
	Zn1000, 22 °C	Zn5 + 4 °C	Zn1000 + 4 °C
Уменьшение Decrease	высота побега, сухая биомасса побега, интенсивность фотосинтеза, содержание хлорофиллов, содержание каротиноидов, оводненность shoot height, shoot dry weight, intensity of photosynthesis, chlorophyll content, carotenoid content, water content	высота побега, сухая биомасса побега, содержание хлорофиллов в ССК, интенсивность транспирации shoot height, shoot dry weight, chlorophyll content in the SSC, transpiration rate	высота побега, сухая биомасса побега, интенсивность фотосинтеза, интенсивность транспирации, оводненность shoot height, shoot dry weight, intensity of photosynthesis, transpiration rate, water content
Отсутствие изменений No change	соотношение хлорофиллов a/b, содержание хлорофиллов в ССК, интенсивность транспирации, WUE chlorophyll ratio a/b, chlorophyll content in the SSC, transpiration rate, WUE	интенсивность фотосинтеза, содержание хлорофиллов, содержание каротиноидов, оводненность, содержание Zn intensity of photosynthesis, chlorophyll content, carotenoid content, water content, Zn content	содержание хлорофиллов, содержание каротиноидов, соотношение хлорофиллов a/b, содержание хлорофиллов в ССК chlorophyll content, carotenoid content, chlorophyll ratio a/b, chlorophyll content in the SSC
Увеличение Increase	Fv/Fm, содержание Zn Fv/Fm, Zn content	соотношение хлорофиллов a/b, Fv/Fm, WUE chlorophyll ratio a/b, Fv/Fm, WUE	Fv/Fm, WUE, содержание Zn Fv/Fm, WUE, Zn content

Примечание. Fv/Fm – потенциальный квантовый выход фотохимической активности ФСII, WUE – эффективность использования воды.

Note. Fv/Fm – potential quantum yield of photochemical activity of PSII, WUE – water use efficiency.

при использовании концентрации металла 50 мкМ снижается фотосинтетическая активность [Feigl et al., 2016], а при применении концентрации 100 мкМ уменьшается содержание хлорофиллов и каротиноидов [Ghnaya et al., 2009]. В отличие от этого у *B. chinensis* при использовании концентрации цинка 200 мг/кг субстрата содержание хлорофиллов, напротив, возрастало [Yang et al., 2012], а у *Sinapis alba* – сохранялось на уровне контроля даже при применении концентрации 1000 мг/кг субстрата [Soleimannejad et al., 2020]. По мнению авторов, поддержание необходимого уровня зеленых и желтых пигментов и фотосинтетической активности характерно для устойчивых к цинку растений. Высокая металлоустойчивость растений, как известно, обеспечивается целым рядом механизмов, действующих на разных уровнях организации: организменном, тканевом и молекулярно-генетическом. В частности, сохранению высокой активности ФСА и водного режима в присутствии тяжелых металлов способствуют адаптационные изменения мезоструктуры листа и устьичного аппарата, которые различаются в зависимости от вида растений и вида металла, а также от поддержания необходимого количества пигментов и активности ФСII. Кроме того, металлоустойчивость растений обеспечивается активацией экспрессии генов белков, участвующих в синтезе хелаторов, а также генов транспортных белков и субъединиц вакуолярной Н⁺АТФазы, которые участвуют в связывании ионов металла в цитоплазме клеток и их транспорте в вакуоль. Также в адаптации растений к тяжелым металлам значительная роль отводится антиоксидантной системе, компоненты которой защищают клетки растений от окислительного стресса [Казнина, 2016].

Данных о воздействии низкой температуры на растения этого семейства крайне мало. Тем не менее известно, что у растений *Brassica oleracea* (var. *acephala*) при 8 °С уменьшалось содержание хлорофиллов и каротиноидов, что коррелировало со снижением продуктивности [Ljubej et al., 2021a; Šamec et al., 2022]. В наших опытах при воздействии низкой температуры на растения *B. juncea* (вариант Zn5 + 4 °С) скорость фотосинтеза лишь несколько снижалась по сравнению с контролем, чему, очевидно, способствовало поддержание необходимого количества хлорофиллов и каротиноидов, увеличение соотношения хлорофиллов (*a/b*) и потенциального квантового выхода фотохимической активности ФСII (*Fv/Fm*), а также повышение фотосинтетической эффективности использования воды (*WUE*).

При этом и оводненность тканей побега была на уровне растений, находящихся в оптимальных условиях роста.

В отличие от фотосинтеза скорость транспирации в большей степени зависела от температурных условий. Так, в обоих вариантах опыта с воздействием низкой температуры (Zn5 + 4 °С, Zn1000 + 4 °С) наблюдалось замедление интенсивности транспирации, тогда как избыток цинка при оптимальной температуре практически не влиял на этот показатель (рис. 2).

Отметим также, что в условиях избытка цинка содержание металла в листьях *B. juncea* оказалось меньше при температуре 4 °С по сравнению с 22 °С. Отчасти это связано с меньшим поступлением этого элемента, что характерно для холодных условий. Однако в целом оно все равно было гораздо выше, чем в вариантах с его низкой концентрацией. Известно, что у большинства видов сельскохозяйственных растений визуально фиксируемые признаки тех или иных нарушений, обусловленных избытком цинка, наступают уже при его содержании 300–500 мкг/г сухой массы [Кирюшин, 2019]. В отличие от этого у горчицы сарептской даже при концентрациях, превышающих эти величины на порядок, полной остановки роста и накопления биомассы не происходило и не наблюдалось признаков повреждений растений.

Заключение

Проведенные исследования показали, что горчица сарептская способна произрастать в условиях избытка цинка в корнеобитаемой среде, а также характеризуется высокой устойчивостью к низкой температуре, что, в частности, подтверждается ее способностью поддерживать в этих условиях высокую скорость фотосинтеза. Это обеспечивается в том числе сохранением высокого уровня хлорофиллов и каротиноидов, увеличением соотношения хлорофиллов, а также повышением фотосинтетической эффективности использования воды.

Помимо этого установлено, что горчица сарептская хорошо адаптируется и к одновременному воздействию изученных стресс-факторов, один из которых химической природы, а другой – физической. При этом синергетический эффект в их действии отсутствовал. Отметим также и то, что при температуре 4 °С в условиях избытка цинка в корнеобитаемой среде содержание металла в надземных органах растений оказалось гораздо меньше, чем при температуре 22 °С.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод о возможности

использования горчицы сарептской сорта Ника в фиторемедиации загрязненных цинком почв в северных регионах, где кратковременные снижения температуры в течение вегетационного сезона наблюдаются достаточно часто. Однако для более точного утверждения этого требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

- Гавриленко В. Ф., Жигалова Т. В. Фотосинтез. Физиология растений: учебник для студентов вузов / Под ред. И. П. Ермакова. М.: Академия, 2005. С. 108–211.
- Казнина Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства Роасеae к тяжелым металлам: Дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск, 2016. 258 с.
- Кирюшин В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139. doi: 10.1134/S0032180X19070062
- Методика определения элементного состава почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами анализа / ИПТМ РАН. Черноголовка, 2002. 34 с.
- Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140
- Холопцева Е. С., Казнина Н. М. Влияние повышенных концентраций цинка в корнеобитаемой среде на фотосинтез и водный обмен горчицы белой // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 4(79). С. 56–66. doi: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_56
- Balafrej H., Bogusz D., Triqui Z-El. A., Guedira A., Bendaou N., Smouni A., Fahr M. Zinc hyperaccumulation in plants: A review // Plants. 2020. Vol. 9, no. 5. P. 562. doi: 10.3390/plants9050562
- Bortoloti G. A., Baron D. Phytoremediation of toxic heavy metals Brassica plants: a biochemical and physiological approach // Environ. Adv. 2022. Vol. 8. P. 100204. doi: 10.1016/j.envadv.2022.100204
- Chasapis C. T., Ntoupa P. S. A., Spiliopoulou C. A., Stefanidou M. E. Recent aspects of the effects of zinc on human health // Arch. Toxicol. 2020. Vol. 94. P. 1443–1460. doi: 10.1007/s00204-020-02702-9
- Das S., Sen M., Saha C., Chakraborty D., Das A., Banerjee M., Seal A. Isolation and expression analysis of partial sequences of heavy metal transporters from *Brassica juncea* by coupling high throughput cloning with a molecular finger printing technique // Planta. 2011. Vol. 234. P. 139–156. doi: 10.1007/s00425-011-1376-1
- Duquène L., Vandenhoove H., Tack F., Meers E., Baeten J., Wannijn J. Enhanced phytoextraction of uranium and selected heavy metals by Indian mustard and ryegrass using biodegradable soil amendments // Sci. Total Environ. 2009. Vol. 407(5). P. 1496–1505. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.049
- Feigl G., Kolbertn Z., Lehotai N., Molnár A., Ördög A., Bordé A., Laskay G., Erdei L. Different zinc sensitivity of Brassica organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. Vol. 125. P. 141–152. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.006
- Ghnaya A. B., Charles G., Hourmant A., Hamida J. B., Branchard M. Physiological behaviour of four rapeseed cultivar (*Brassica napus* L.) submitted to metal stress // Comptes Rendus. Biologies. 2009. Vol. 332, no. 4. P. 363–370. doi: 10.1016/j.crvi.2008.12.001
- Repkina N., Nilova I., Kaznina N. Effect of zinc excess in substrate on physiological responses of *Sinapis alba* L. // Plants. 2023. Vol. 12. P. 211. doi: 10.3390/plants12010211
- Lichtenthaler H. K., Wellburn A. L. Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Trans. 1983. Vol. 11. P. 591.
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids – pigments of photosynthetic biomembranes // Methods Enzymol. 1987. Vol. 148. P. 350. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
- Li S., Zeng L., Su Z. Wheat growth, photosynthesis and physiological characteristics under different soil Zn levels // J. Integr. Agr. 2022. Vol. 21, no. 7. P. 1927–1940. doi: 10.1016/S2095-3119(21)63643-2
- Ljubej V., Karalija E., Salopek-Sondi B., Šamec D. Effects of short-term exposure to low temperatures on proline, pigments, and phytochemicals level in kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) // Horticulturae. 2021a. Vol. 7. P. 341. doi: 10.3390/horticulturae7100341
- Ljubej V., Redovniković I. R., Salopek-Sondi B., Smolko A., Roje S., Šamec D. Chilling and freezing temperature stress differently influence glucosinolates content in *Brassica oleracea* var. *acephala* // Plants. 2021b. Vol. 10. P. 1305. doi: 10.3390/plants10071305
- Mahmoudi H., Salah I. B., Zaouali W., Zorrig W., Smaoui A., Ali T., Gruber M., Ouerghi Z., Hosni K. Impact of zinc excess on germination, growth parameters and oxidative stress of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2021. Vol. 106, no. 5. P. 899–907. doi: 10.1007/s00128-021-03188-6
- Marchiol L., Assolari S., Sacco P., Zerbi G. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) growth on multicontaminated soil // Environ. Pollut. 2004. Vol. 132. P. 21–27. doi: 10.1016/j.envpol.2004.04.001
- Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // J. Exp. Bot. 2000. Vol. 51. P. 659–668. doi: 10.1093/jexbot/51.345.659
- Moreira H., Pereira S. I. A., Mench M., Garbisu C., Kidd P., Castro P. M. L. Phytomanagement of metal(loid)-contaminated soils: options, efficiency and value // Front. Environ. Sci. 2021. Vol. 9. P. 661423. doi: 10.3389/fenvs.2021.661423
- Moustakas M., Dobrikova A., Sperdouli I., Hanč A., Adamakis I. D. S., Moustaka J., Apostolova E. A. Hormetic spatiotemporal photosystem II response mechanism of salvia to excess zinc exposure

// Int. J. Mol. Sci. 2022. Vol. 23. P. 11232. doi: 10.3390/ijms231911232

Pasricha S., Mathur V., Garg A., Lenka S., Verma K., Agarwal S. Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators— an analysis. Heavy metal tolerance in hyperaccumulators // Environ. Chall. 2021. Vol. 4. P. 100197. doi: 10.1016/j.envc.2021.100197

Šamec D., Ljubej V., Redovniković I. R., Fistanić S., Salopek-Sondi B. Low temperatures affect the physiological status and phytochemical content of flat leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) sprouts // Foods. 2022. Vol. 11. P. 264. doi: 10.3390/foods11030264

Singh S., Singh V. Effect of rate and source of zinc on yield, quality and uptake of nutrients in Indian mustard (*Brassica juncea*) and soil fertility // Indian J. Agric. Sci. 2017. Vol. 87(12). P. 1701–1705. doi: 10.56093/ijas.v87i12.76517

Solelmannejad Z., Sadeghlpour H. R., Abdol-zadeh A., Golallpour M. Physiological responses of white mustard grown in Zn-contaminated soils // Acta Physiol. Plant. 2020. Vol. 42. P. 131–145.

Tambussi E. A., Bort J., Araus J. L. Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: A review of physiological aspects // Ann. Appl. Biol. 2007. Vol. 150. P. 307–321.

Xu Q. Q., Sami A., Zhang H., Jin X. Z., Zheng W. Y., Zhu Z. Y., Wu L. I., Lei Y. H., Chen Z. P., Yu Y., Zhang F. G., Zhou K. G., Zhu Z. H. Combined influence of low temperature and drought on different varieties of rapeseed (*Brassica napus* L.) // S. Afr. J. Bot. 2022. Vol. 147. P. 400–414. doi: 10.1016/j.sajb.2022.02.003

Yan L., Tariq S., Cheng Y., Lü Y., Zhang X.-K., Zou X. L. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) // J. Integr. Agric. 2019. Vol. 18, no. 12. P. 2742–2752. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62147-1

Yang H., Zhang J., Li J. Physiological response to zinc pollution of rape (*Brassica chinensis* L.) in paddy soil ecosystem // Adv. Mater. 2012. Vol. 356. P. 39–43. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.39

References

Balafrej H., Bogusz D., Triqui Z-El. A., Guedira A., Bendaou N., Smouni A., Fahr M. Zinc hyperaccumulation in plants: A review. *Plants*. 2020;9(5):562. doi: 10.3390/plants9050562

Bortoloti G. A., Baron D. Phytoremediation of toxic heavy metals Brassica plants: a biochemical and physiological approach. *Environ. Adv.* 2022;8:100204. doi: 10.1016/j.envadv.2022.100204

Chasapis C. T., Ntoupa P. S. A., Spiliopoulou C. A., Stefanidou M. E. Recent aspects of the effects of zinc on human health. *Arch. Toxicol.* 2020;94:1443–1460. doi: 10.1007/s00204-020-02702-9

Das S., Sen M., Saha C., Chakraborty D., Das A., Banerjee M., Seal A. Isolation and expression analysis of partial sequences of heavy metal transporters from *Brassica juncea* by coupling high throughput cloning with a molecular finger printing technique. *Planta*. 2011;234:139–156. doi: 10.1007/s00425-011-1376-1

Duquène L., Vandenhove H., Tack F., Meers E., Baeten J., Wannijn J. Enhanced phytoextraction of uranium and selected heavy metals by Indian mustard and ryegrass using biodegradable soil amendments. *Sci. Total Environ.* 2009;407(5):1496–1505. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.049

Feigl G., Kolbertn Z., Lehotai N., Molnár A., Ördög A., Bordé A., Laskay G., Erdei L. Different zinc sensitivity of Brassica organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2016;125:141–152. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.006

Gavrilenko V. F., Zhigalova T. V. Photosynthesis. Plant physiology: Textbook for students of higher education institutions. Moscow: Akademiya; 2005. P. 108–211. (In Russ.)

Ghnaya A. B., Charles G., Hourmant A., Hamida J. B., Branchard M. Physiological behaviour of four rapeseed cultivar (*Brassica napus* L.) submitted to metal stress. *Comptes Rendus. Biologies.* 2009;332(4): 363–370. doi: 10.1016/j.crv.2008.12.001

Kaznina N. M. Physiological, biochemical and molecular genetic mechanisms of resistance of plants of the Poaceae family to heavy metals: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Petrozavodsk; 2016. 258 p. (In Russ.)

Kholoptseva E. S., Kaznina N. M. Effect of elevated zinc concentrations in the root-inhabited environment on photosynthesis and water metabolism in white mustard. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(4):56–66. (In Russ.)

Kiryushin V. I. Control of soil fertility and productivity of agrocenoses in adaptive landscape farming systems. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2019;9:1130–1139. (In Russ.). doi: 10.1134/S0032180X19070062

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. L. Determination of total carotenoides and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983;11:591.

Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids – pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 1987;148:350. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

Li S., Zeng L., Su Z. Wheat growth, photosynthesis and physiological characteristics under different soil Zn levels. *J. Integr. Agr.* 2022;21(7):1927–1940. doi: 10.1016/S2095-3119(21)63643-2

Ljubej V., Karalija E., Salopek-Sondi B., Šamec D. Effects of short-term exposure to low temperatures on proline, pigments, and phytochemicals level in kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*). *Horticulturae*. 2021;7:341. doi: 10.3390/horticulturae7100341

Ljubej V., Redovniković I. R., Salopek-Sondi B., Smolko A., Roje S., Šamec D. Chilling and freezing temperature stress differently influence glucosinolates content in *Brassica oleracea* var. *acephala*. *Plants*. 2021;10:1305. doi: 10.3390/plants10071305

Mahmoudi H., Salah I. B., Zaouali W., Zorrig W., Smaoui A., Ali T., Gruber M., Ouerghi Z., Hosni K. Impact of zinc excess on germination, growth parameters and oxidative stress of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2021;106(5): 899–907. doi: 10.1007/s00128-021-03188-6

- Marchiol L., Assolari S., Sacco P., Zerbi G. Phyto-extraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus satives*) growth on multicontaminated soil. *Environ. Pollut.* 2004;132:21–27. doi: 10.1016/j.envpol.2004.04.001
- Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J. Exp. Bot.* 2000;51: 659–668. doi: 10.1093/jexbot/51.345.659
- Methodology for determining the elemental composition of soils, grounds and bottom sediments using atomic emission and mass spectral methods of analysis. IPTM RAS: Chernogolovka: IPTM RAN; 2002. 34 p. (In Russ.)
- Moreira H., Pereira S. I. A., Mench M., Garbisu C., Kidd P., Castro P. M. L. Phytomanagement of metal(loid)-contaminated soils: options, efficiency and value. *Front. Environ. Sci.* 2021;9:661423. doi: 10.3389/fenvs.2021.661423
- Moustakas M., Dobrikova A., Sperdouli I., Hanč A., Adamakis I. D. S., Moustaka J., Apostolova E. A. Hormetic spatiotemporal photosystem II response mechanism of salvia to excess zinc exposure. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;23:11232. doi: 10.3390/ijms231911232
- Pasricha S., Mathur V., Garg A., Lenka S., Verma K., Agarwal S. Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulator – an analysis. Heavy metal tolerance in hyperaccumulators. *Environ. Chall.* 2021;4:100197. doi: 10.1016/j.envc.2021.100197
- Repkina N., Nilova I., Kaznina N. Effect of zinc excess in substrate on physiological responses of *Sinapis alba* L. *Plants.* 2023;12:211. doi: 10.3390/plants12010211
- Šamec D., Ljubej V., Redovniković I. R., Fistanić S., Salopek-Sondi B. Low temperatures affect the physiological status and phytochemical content of flat leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) sprouts. *Foods.* 2022;11:264. doi: 10.3390/foods11030264
- Singh S., Singh V. Effect of rate and source of zinc on yield, quality and uptake of nutrients in Indian mustard (*Brassica juncea*) and soil fertility. *Indian J. Agric. Sci.* 2017;87(12):1701–1705. doi: 10.56093/ijas.v87i12.76517
- Solelmannejad Z., Sadeghpour H. R., Abdol-zadeh A., Golallpour M. Physiological responses of white mustard grown in Zn-contaminated soils. *Acta Physiol. Plant.* 2020;42:131–145.
- Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhova M. V., Kolodey V. S. Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: the method and accuracy estimation in the case study of Early Precambrian mafic complexes. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2015;7:54–73. (In Russ.). doi: 10.17076/geo140
- Tambussi E. A., Bort J., Araus J. L. Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: A review of physiological aspects. *Ann. Appl. Biol.* 2007; 150:307–321.
- Xu Q. Q., Sami A., Zhang H., Jin X. Z., Zheng W. Y., Zhu Z. Y. Wu L. I., Lei Y. H., Chen Z. P., Y., Yu Y., Zhang F. G., Zhou K. G., Zhu Z. H. Combined influence of low temperature and drought on different varieties of rapeseed (*Brassica napus* L.). *S. Afr. J. Bot.* 2022; 147:400–414. doi: 10.1016/j.sajb.2022.02.003
- Yan L., Tariq S., Cheng Y., Lü Y., Zhang X.-K., Zou X. L. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.). *J. Integr. Agric.* 2019;18(12):2742–2752. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62147-1
- Yang H., Zhang J., Li J. Physiological response to zinc pollution of rape (*Brassica chinensis* L.) in paddy soil ecosystem. *Adv. Mater.* 2012;356:39–43. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.39

Поступила в редакцию / received: 01.04.2025; принята к публикации / accepted: 22.04.2025.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Холопцева Екатерина Станиславовна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: holoptseva@krc.karelia.ru

Казнина Наталья Мстиславовна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Батова Юлия Валерьевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: batova@krc.karelia.ru

Титов Александр Федорович

чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, профессор, руководитель лаборатории экологической физиологии растений

e-mail: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Kholoptseva, Ekaterina

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Kaznina, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Batova, Yulia

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Titov, Alexander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory