



Семенная продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в корнеобитаемой среде

© 2026. Н. М. Казнина , Е. С. Холопцева, Ю. В. Батова

Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск, Российская Федерация

В настоящее время в России и других странах мира увеличиваются посевные площади горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.), что связано с ее многоцелевым использованием, а также хорошей адаптацией к неблагоприятным факторам внешней среды. Известна также способность горчицы сарептской произрастать на почвах с повышенными концентрациями цинка. При этом содержание ионов этого металла в семенах растений, как правило, невысокое вследствие эффективной работы механизмов его детоксикации. Это предполагает возможность выращивания горчицы сарептской на семена на почвах с высоким уровнем цинка. В настоящей работе изучено влияние разных концентраций цинка (5, 50, 100 и 150 мг/кг субстрата) на семенную продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской (Славянка и Золушка). Исследования проведены в песчаном субстрате в условиях вегетационного опыта. Обнаружено, что высокие концентрации цинка в большей степени влияют на количество и массу семян, в меньшей – на количество стручков и массу 1000 семян. Так, у сорта Славянка при концентрации цинка 150 мг/кг субстрата количество и масса семян уменьшились в 2 раза по сравнению с контролем. У сорта Золушка уже при концентрации металла 100 мг/кг субстрата оба показателя были в 4 раза меньше, чем у растений контрольного варианта. На основании полученных результатов составлен ряд показателей семенной продуктивности по степени отрицательного воздействия на них цинка. Выявлено, что качество сформированных семян, определяемое по энергии прорастания, всхожести семян и начальному росту проростков, оказалось высоким во всех вариантах опыта независимо от содержания цинка в субстрате. Более того, семена успешно проросли и на «провокационном фоне» – высокой концентрации цинка (1000 мкМ). Наиболее устойчив к высоким концентрациям цинка – сорт Славянка. Сделан вывод о возможности и перспективности использования горчицы сарептской для выращивания на семена на загрязненных цинком почвах.

Ключевые слова: *Brassica juncea* (L.) Czern., цинк, урожай семян, масса 1000 семян, энергия прорастания, всхожесть

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (тема № FMEN 2022-0004). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казнина Н. М., Холопцева Е. С., Батова Ю. В. Семенная продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в корнеобитаемой среде. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):380–389. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.380-389>

Поступила в редакцию: 21.08.2025

Принята к публикации: 06.04.2026

Доработана после рецензирования: 15.10.2025

Опубликована онлайн: 27.04.2026

Seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars under different zinc concentrations in the root environment

© 2026. Natalia M. Kaznina , Ekaterina S. Kholoptseva, Yulia V. Batova

Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

Currently, in Russia and other countries, the areas under Sarepta mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern.) are increasing, which is associated with its multi-purpose use, as well as good adaptation to adverse environmental factors. The ability of Sarepta mustard to grow on soils with increased zinc concentrations is also known. At the same time, the content of this metal in plant seeds is usually low due to the effective operation of its detoxification mechanisms. This suggests the possibility of growing Sarepta mustard for seeds on soils with a high zinc level. In this work, the effect of different zinc concentrations (5, 50, 100 and 150 mg/kg of substrate) on seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars ('Slavyanka' and 'Zolushka') was studied. The research was carried out in a sandy substrate under vegetation experiment conditions. It has been established that high zinc concentrations have a greater effect on the weight and number of seeds, and a lesser effect on the pods number and 1000 seeds weight. Thus, at a zinc concentration of 150 mg/kg of substrate, the number and weight of seeds in the 'Slavyanka' cultivar were 2 times less than in the control. In the 'Zolushka' cultivar even at zinc concentration of 100 mg/kg of substrate both parameters were 4 times lower than in the plants of the control variant. Based on the results, a number of seed productivity parameters were compiled according to the degree of zinc negative effect on them. It was also revealed that the quality of the formed seeds, determined by the germination energy, seed viability and the initial growth, was

high in all variants regardless of the zinc content in the substrate. Moreover, the seeds were able to germinate successfully even on a "provocative background" – a high zinc concentration (1000 µM). The 'Slavyanka' cultivar turned out to be the most resistant to high zinc concentrations. A conclusion was made about the possibility and prospects of using Sarepta mustard for growing seeds on zinc-contaminated soils.

Keywords: *Brassica juncea* (L.) Czern., zinc, seed yield, 1000 seeds weight, germination energy, germination

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (theme No. FMEN 2022-0004).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Kaznina N. M., Kholoptseva E. S., Batova Yu. V. Seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars under different zinc concentrations in the root environment. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):380–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.380-389>

Received: 21.08.2025

Revised: 15.10.2025

Accepted for publication: 06.04.2026

Published online: 27.04.2026

В настоящее время во многих странах мира возрастает интерес к сельскохозяйственным культурам из семейства *Brassicaceae*, что объясняется их многофункциональностью, хозяйственной ценностью, а также увеличением производства масличного сырья и потребления биотоплива [1, 2]. В России предпочтение отдают горчице сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.), посевные площади которой, в отличие от других видов этого семейства, постоянно увеличиваются [3]. Во многом это связано с тем, что горчица сарептская является универсальной многоцелевой культурой, которую выращивают для масличных, кормовых, сидеральных, лекарственных и технических целей. Кроме того, горчица сарептская хорошо адаптирована к целому ряду неблагоприятных факторов внешней среды, что позволяет ей успешно расти почти во всех климатических зонах [4, 5]. Известно также, что эта культура обладает высокой металлоустойчивостью и способна в довольно больших количествах накапливать некоторые тяжелые металлы, в том числе цинк, в подземных и надземных органах [6, 7], что позволяет рассматривать ее как перспективный вид для использования в фиторемедиации загрязненных металлами территорий [8].

Цинк широко распространен в природе, его среднее содержание в земной коре составляет около 83 мг/кг, а в поверхностных слоях почв изменяется от 17 до 125 мг/кг¹. На содержание цинка в почвах сельскохозяйственного назначения большое влияние оказывает хозяйственная деятельность человека, в том числе внесение высоких доз минеральных удобрений,

применение гербицидов и пестицидов. В результате в отдельных регионах содержание этого металла в почве может в десятки и даже сотни раз превышать ПДК [9].

Способность представителей семейства *Brassicaceae*, как и других металлоустойчивых видов растений, произрастать на почвах с высоким содержанием цинка обеспечивается наличием целого ряда механизмов, действующих на разных уровнях организации, среди них: связывание ионов металла различными лигандами в клеточной стенке, плазмалемме и цитоплазме клеток, изоляция ионов и их комплексов в вакуоли и других [10, 11]. Эффективное функционирование этих механизмов в корне и побеге ограничивает поступление избыточных количеств металла в репродуктивные органы и семена, поэтому в семенах значительного увеличения содержания цинка, как правило, не наблюдается [12]. Вследствие этого представляется перспективным выращивание горчицы сарептской на семена на почвах с повышенным содержанием цинка. Поскольку цинк является необходимым микроэлементом, некоторое повышение его концентрации в семенах горчицы может быть полезно при их использовании в пищевой промышленности.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследований, касающихся влияния избытка цинка на семенную продуктивность растений горчицы сарептской, в литературе крайне мало. Хотя известно, что избыток некоторых металлов в почве может отрицательно сказаться на элементах семенной продуктивности у растений и привести к значительному снижению их урожая [13, 14].

¹Битюцкий Н. П. Микроэлементы и растение: учебное пособие. СПб: изд-во С.-Петерб. ун-та, 1999. 232 с. URL: <https://djuvonline/file/OISqngC6NeaOD>

Цель исследования – сравнительное изучение семенной продуктивности и качества семенного потомства у двух сортов горчицы сарептской при выращивании в условиях избытка цинка в корнеобитаемой среде.

Научная новизна – впервые изучено влияние разных концентраций цинка на семенную продуктивность и качество семян у двух сортов горчицы сарептской.

Материал и методы. Объектом исследования были растения горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.) сортов Славянка и Золушка, предоставленные отделом генетических ресурсов масличных и прядильных культур ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова». Оба сорта являются безэруковыми, их семена рекомендованы для производства горчичного масла. Сорт Золушка более холодоустойчив и допущен для выращивания во всех регионах Российской Федерации, в том числе Северном и Северо-Западном; сорт Славянка менее холодоустойчив и допущен для возделывания в более южных районах.

Растения выращивали на Агробиологической станции КарНЦ РАН РАН (61.75 с. ш. и 34.35 в. д.) в песчаном субстрате в условиях вегетационного опыта при естественном освещении. Семена горчицы, предварительно замоченные на 3 суток в дистиллированной воде, высевали в вегетационные сосуды объемом 5 л с предварительно промытым и прокаленным песком (6 кг). Плотность посева – 12 растений на сосуд. Цинк в форме сульфата ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) в концентрациях 5 мг/кг (оптимальная), 50, 100 и 150 мг/кг вносили однократно в сухом виде при закладке опыта. Выбранные концентрации цинка в 2, 4 и 6 раз превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) для песчаных почв (ГН 2.1.7.2041-06)². Полив осуществляли питательным раствором Хогланда-Арнона³ (без добавления солей цинка) по мере подсыхания субстрата. Повторность каждого варианта опыта трехкратная в течение двух вегетационных сезонов (2022–2023 гг.).

Для оценки влияния цинка на семенную продуктивность определяли количество стручков, количество и массу семян с сосуда, массу 1000 семян. Стручки снимали по мере их

созревания. О качестве сформированных семян судили по энергии прорастания и всхожести, а также по начальному росту проростков второй генерации и их устойчивости к высокой концентрации цинка (1000 мкМ). Концентрация цинка выбрана на основе предварительных опытов, в которых изучалось влияние возрастающих концентраций (500, 1000, 1500, 2000 и 3000 мкМ) на прорастание семян горчицы. Концентрация 1000 мкМ оказалась наиболее высокой, при которой семена проросли. При более высоких концентрациях прорастания семян не наблюдалось. Семена в количестве 25 шт. в 4-кратной повторности замачивали в чашках Петри с дистиллированной водой, а также с раствором, содержащим ионы цинка, и проращивали в темноте при температуре 25 °С. Энергию прорастания отмечали на 3-и сутки, всхожесть – на 6-е сутки⁴, кроме того, на 6-е сутки у проростков измеряли длину корешка и гипокотыля.

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием пакета статистического анализа Microsoft Office Excel 2007 и PAST 4.0. В таблицах и на графиках представлены средние значения и их стандартные ошибки ($M \pm m$). Достоверность различий между вариантами оценивали с помощью критерия Стьюдента. Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Изучение показателей семенной продуктивности горчицы сарептской выявило наличие выраженных количественных и качественных сортовых различий. В частности, количество стручков, сформированных на растении сорта Славянка (рис. 1, а), во всех вариантах опыта было больше, чем у сорта Золушка (рис. 1, б), причем, если при концентрации цинка 5 и 50 мг/кг субстрата – в 1,3 раза, то при 100 мг/кг субстрата – в 2,2 раза. Кроме того, при наиболее высокой концентрации металла (150 мг/кг субстрата) у растений сорта Золушка наблюдалось значительное торможение роста и развития, и к завершению опыта они находились в вегетативной фазе. Напротив, у растений сорта Славянка при концентрации цинка 150 мг/кг субстрата стручки были сформированы, хотя их количество оказалось почти в 2 раза меньше, чем в варианте с концентрацией металла 5 мг/кг субстрата.

²Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 23 января 2006 г. № 1 О введении в действие гигиенических нормативов ГН 2.1.7.2041-06. [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=299876> (дата обращения: 16.07.2025).

³Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment station. 1938. Vol. 347. 39 pp. URL: <https://archive.org/details/waterculturemeth347hoag/page/n5/mode/2up>

⁴Семена и посадочный материал сельскохозяйственных культур. М.: Изд-во Стандартов, 1977. С. 270–302.

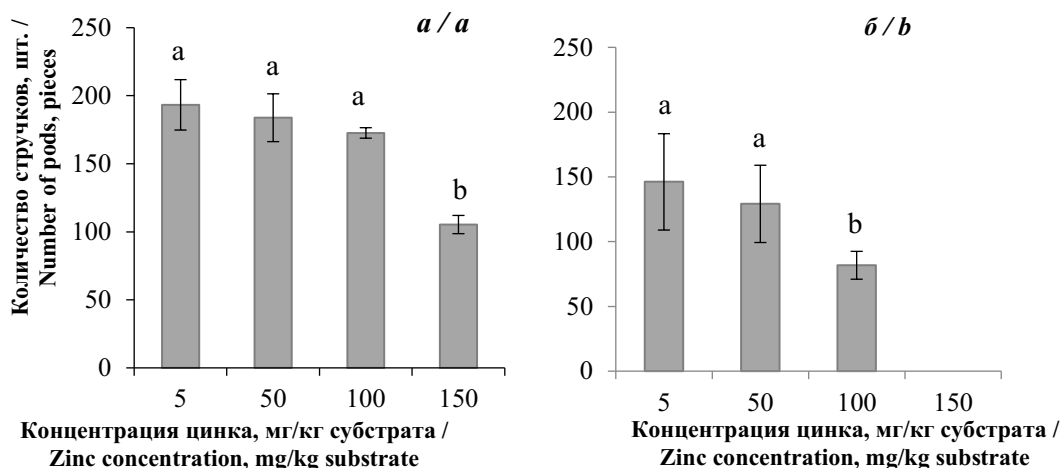


Рис. 1. Влияние цинка на количество стручков у сортов горчицы сарептской: *a* – Славянка; *б* – Золушка. Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при $p < 0,05$ /

Fig. 1. The effect of zinc on the number of pods in Sarepta mustard cultivars: *a* – ‘Slavyanka’; *b* – ‘Zolushka’. Different letters indicate significant differences within the cultivar at $p < 0.05$

Количество сформированных семян и их масса в варианте с наименьшей концентрацией цинка у растений обоих сортов было практически равным (рис. 2, *a, б*). Однако при повышении концентрации металла наблюдали отчетливые сортовые различия. У растений сорта Славянка при концентрации цинка 50 мг/кг

субстрата количество семян было таким же, как в варианте с 5 мг/кг субстрата. При дальнейшем увеличении концентрации до 100 и 150 мг/кг субстрата отмечено статистически значимое снижение семенной продуктивности почти в 2 раза по сравнению с минимальной концентрацией цинка (рис. 2, *a*).

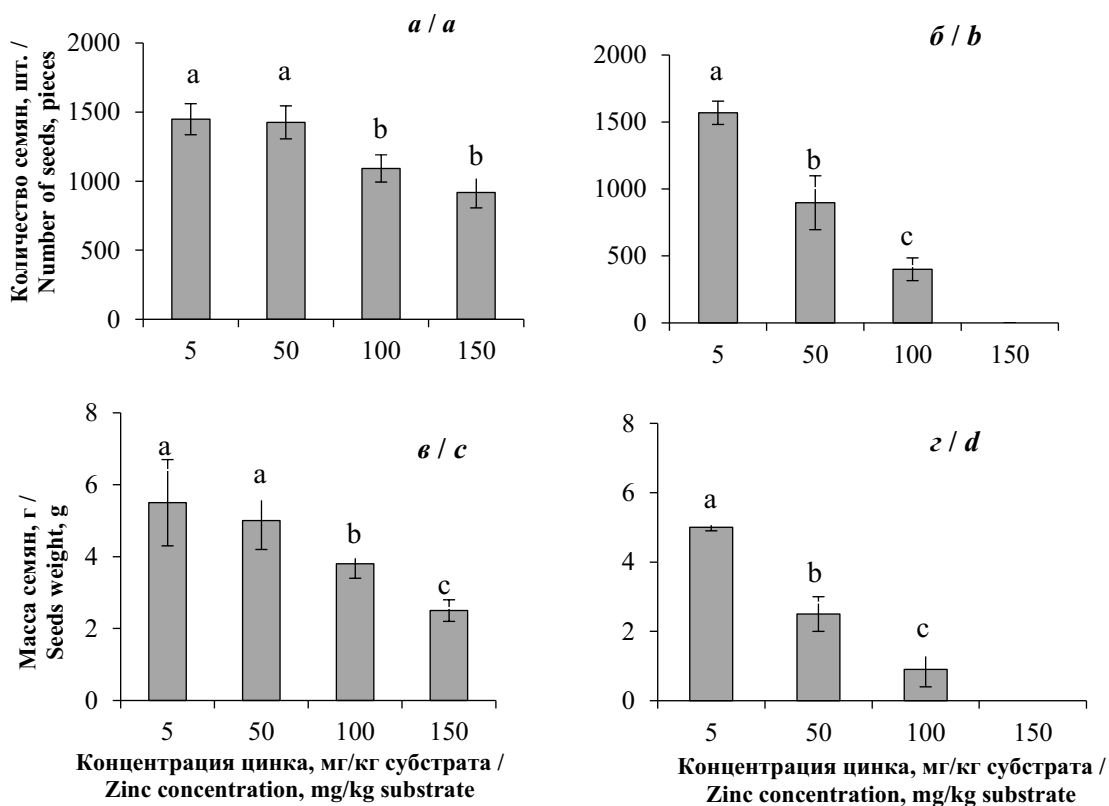


Рис. 2. Влияние цинка на количество (*a, б*) и массу семян (*в, з*) у сортов горчицы сарептской Славянка (*a, в*) и Золушка (*б, з*). Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при $p < 0.05$ /

Fig. 2. The effect of zinc on the seed number (*a, b*) and seed weight (*c, d*) in Sarepta mustard cultivars ‘Slavyanka’ (*a, c*) and ‘Zolushka’ (*b, d*). Different letters indicate significant differences within the cultivar at $p < 0.05$

Аналогично уменьшалась и масса семян (рис. 2, в). У растений сорта Золушка уже при концентрации цинка 50 мг/кг субстрата количество семян существенно снизилось почти в 1,7 раза относительно варианта с концентрацией 5 мг/кг субстрата (рис. 2, б), а их масса – более чем в 2 раза (рис. 2, г). Дальнейшее повышение концентрации металла до 100 мг/кг привело почти к 4-кратному снижению обоих показателей.

Масса 1000 семян является одним из важных параметров семенной продуктивности

растений. В ходе исследований было обнаружено, что у обоих сортов горчицы сарептской этот показатель изменялся в зависимости от концентрации цинка в субстрате в гораздо меньшей степени, чем количество стручков или семян (рис. 1, 2). Лишь высокие концентрации металла – 150 мг/кг субстрата у сорта Славянка (рис. 3, а) и 100 мг/кг субстрата у сорта Золушка (рис. 3, б) – приводили к значимому снижению массы 1000 семян по сравнению с минимальной концентрацией.

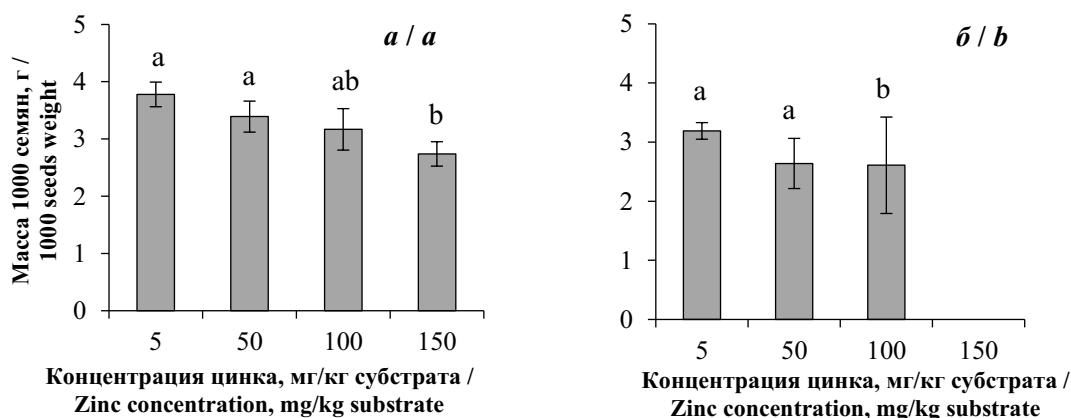


Рис. 3. Влияние цинка на массу 1000 семян у сортов горчицы сарептской: а – Славянка; б – Золушка. Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при $p < 0,05$ /

Fig. 3. The effect of zinc on the 1000 seeds weight of Sarepta mustard cultivars: a – ‘Slavyanka’; b – ‘Zolushka’. Different letters indicate significant differences within the cultivar at $p < 0.05$

Известно, что показатель «масса 1000 семян» характеризует запас питательных веществ в семенах [14]. Обнаруженное уменьшение веса семян при высоких концентрациях цинка свидетельствует о снижении количества необходимых для формирования проростка веществ, что в дальнейшем может негативно отразиться на начальном росте растений.

К важным критериям, характеризующим качество семян, относится их жизнеспособность, определяемая по энергии прорастания и всхожести [15]. Известно, что посевные качества семян могут ухудшаться при неблагоприятных условиях окружающей среды, действующих в период их формирования. Например, при воздействии на материнские растения засухи, низкой и высокой температур или при недостатке элементов минерального питания образуются семена низкого качества, характеризующиеся невысокой всхожестью и замедленным начальным ростом проростков [16, 17].

В наших опытах семена обоих сортов горчицы сарептской, сформированные на мате-

ринских растениях при разных концентрациях цинка в субстрате, характеризовались хорошим качеством: энергия прорастания и всхожесть при проращивании на дистиллированной воде во всех вариантах опыта были высокими (табл. 1).

Более того, при проращивании семян горчицы сарептской на растворе с высокой (1000 мкМ) концентрацией цинка отрицательного воздействия металла на энергию прорастания и всхожесть у обоих сортов не наблюдали (табл. 2).

Сохранение высокой всхожести в присутствии избытка цинка, по-видимому, объясняется тем, что ионы тяжелых металлов проникают через семенную оболочку только на заключительной стадии набухания во время ее растрескивания. В это же время начинают действовать механизмы детоксикации металла, обеспечивающие связывание его ионов аминокислотами, поступающими из запасующих тканей зародыша [18].

Помимо жизнеспособности семян, для оценки их качества используют критерий «сила роста семян». Его определение включает

изучение показателей роста проростков на начальных этапах развития, а также определение устойчивости проростков к неблагоприятным условиям внешней среды [19]. Проведенные исследования показали, что, независимо от условий роста материнских растений (содержание цинка в субстрате), при проращивании семян обоих сортов на дистиллированной воде

начальный рост проростков второй генерации был успешным. В частности, различий по длине корня (рис. 4, а) и гипокотыля (рис. 4, б) между разными вариантами практически не было. Хорошей силой роста обладали даже семена, сформированные при высоких концентрациях металла в субстрате – 100 мг/кг (оба сорта) и 150 мг/кг субстрата (сорт Славянка).

Таблица 1 – Посевные качества семян сортов горчицы сарептской при проращивании на дистиллированной воде /

Table 1 – Sowing qualities of seeds of Sarepta mustard cultivars under germination in distilled water

Сорт / Cultivar	Концентрация цинка в субстрате материнских растений, мг/кг / Zinc concentration in the substrate of maternal plants, mg/kg			
	5	50	100	150
Энергия прорастания, % / Germination energy, %				
Славянка / 'Slavyanka'	95,2±2,1	98,3±1,4	92,2±2,1	81,3±2,1
Золушка / 'Zolushka'	93,4±3,8	95,2±1,3	97,2±1,9	-
Всхожесть, % / Viability, %				
Славянка / 'Slavyanka'	79,2±1,2	97,1±1,5	88,1±2,1	77,3±2,1
Золушка / 'Zolushka'	81,2±2,9	85,1±4,2	89,2±2,5	-

Таблица 2 – Посевные качества семян сортов горчицы сарептской при проращивании на растворе цинка в концентрации 1000 мкМ /

Table 2 – Sowing qualities of seeds of Sarepta mustard cultivars under germination in a zinc solution at 1000 μM concentration

Сорт / Cultivar	Концентрация цинка в субстрате материнских растений, мг/кг / Zinc concentration in the substrate of maternal plants, mg/kg			
	5	50	100	150
Энергия прорастания, % / Germination energy, %				
Славянка / 'Slavyanka'	97,1±0,5	98,0±1,5	91,2±2,1	89,2±2,0
Золушка / 'Zolushka'	93,2±3,9	97,0±1,2	97,0±3,0	-
Всхожесть, % / Viability, %				
Славянка / 'Slavyanka'	83,1±1,5	91,0±1,5	87,2±2,1	77,1±2,1
Золушка / 'Zolushka'	84,2±4,1	86,1±4,8	89,2±2,5	-

В отличие от этого, при росте проростков в условиях высокой концентрации цинка у растений обоих сортов заметно тормозился рост корня, о чем свидетельствует уменьшение (по сравнению с проращиванием на дистиллированной воде) длины корешка (рис. 5, а). Аналогичную реакцию у горчицы сарептской при высоких концентрациях цинка наблюдали и другие авторы [20, 21]. Во многом это связано с отрицательным воздействием металла на деление и растяжение клеток [22]. При этом

более устойчивыми к высокой концентрации цинка оказались проростки, полученные из семян, сформированных в условиях низкого содержания металла (5 и 50 мг/кг субстрата), что, вероятно, обеспечивалось большим количеством питательных веществ в семени. Важно отметить, что рост гипокотыля в этом варианте опыта замедлялся в меньшей степени, чем рост корня, что может быть результатом эффективной работы клеточных механизмов детоксикации ионов цинка.

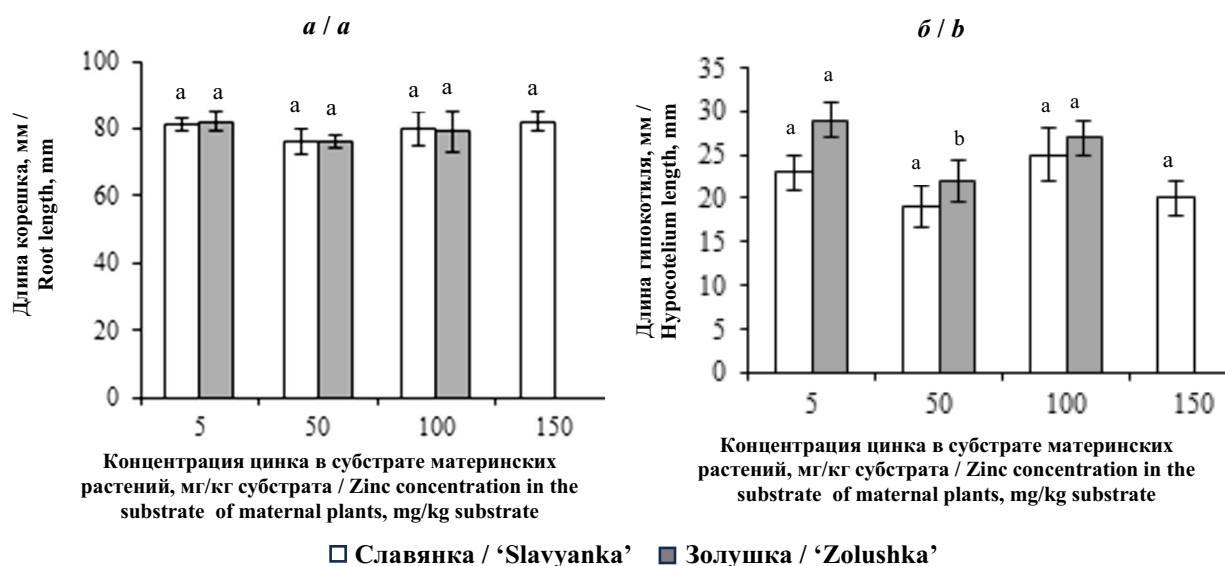


Рис. 4. Длина корешка (а) и hypocotilia (б) у проростков второго поколения сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в субстрате материнских растений (проращивание на дистиллированной воде). Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при $p < 0.05$ /

Fig. 4. Length of the root (a) and hypocotyl (b) in the seedlings of the second generation of Sarepta mustard cultivars at different zinc concentrations in the substrate of the maternal plants (germination in distilled water). Different letters indicate significant differences within the cultivars at $p < 0.05$

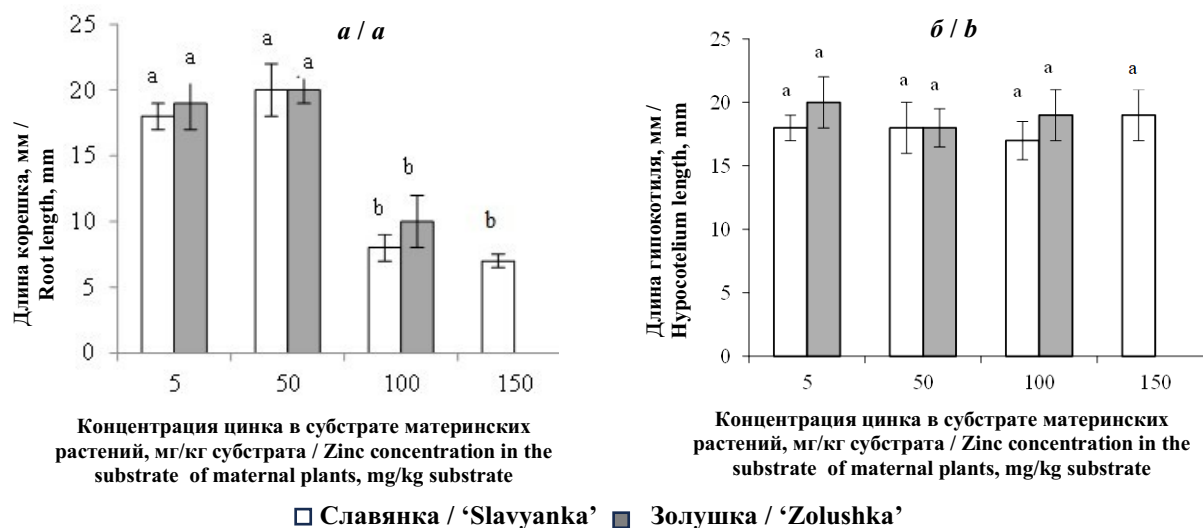


Рис. 5. Длина корешка (а) и hypocotilia (б) у проростков второго поколения сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в субстрате материнских растений (проращивание на растворе цинка в концентрации 1000 мкМ). Разные буквы обозначают достоверные различия внутри сорта при $p < 0.05$ /

Fig. 5. Length of the root (a) and hypocotyl (b) in the seedlings of the second generation of Sarepta mustard cultivars at different zinc concentrations in the substrate of the maternal plants (germination in a zinc solution at 1000 μM concentration). Different letters indicate significant differences within the cultivar at $p < 0.05$

Заключение. Впервые в сравнительном аспекте было изучено влияние разных концентраций цинка на семенную продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской. Растения сорта Славянка оказались более устойчивы к высоким концентрациям металла, чем сорта Золушка. В частности, они смогли перейти к генеративному развитию и сформировать полноценные семена, даже при

концентрации цинка 150 мг/кг субстрата, тогда как у растений сорта Золушка в этих условиях замедлялись рост и развитие, на протяжении всего опыта они оставались в вегетативной фазе. В ходе исследований было также выявлено, что у обоих изученных сортов горчицы высокие концентрации цинка в большей степени влияют на массу и количество семян

на растении, в меньшей – на количество стручков и массу 1000 семян. По степени отрицательного воздействия цинка на показатели семенной продуктивности можно составить следующий ряд (по убыванию): масса семян > количество семян > количество стручков > масса 1000 семян. Проверка качества семян показала, что, независимо от концентрации цинка в корнеобитаемой среде материнских растений, у обоих сортов горчицы семена успешно прорастали

как на дистиллированной воде, так и на провокационном фоне (высокая концентрация цинка) и имели хорошую «силу роста».

В целом горчица сарептская способна сформировать полноценные семена хорошего качества, даже в условиях повышенного содержания цинка в субстрате, что предполагает возможность и перспективность ее использования для выращивания на семена на загрязненных цинком почвах.

Список литературы

1. Лукомец В. М., Зеленцов С. В., Кривошлыков К. М. Перспективы и резервы расширения производства масличных культур в Российской Федерации. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2015;(4(164)):81–102. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25304524> EDN: VHTFHF
2. Zhang X., Jia Q., Jia X., Li J., Sun X., Min L. et al. Brassica vegetables—an undervalued nutritional goldmine. Horticulture Research. 2025;12:uhae302. DOI: <https://doi.org/10.1093/hr/uhae302>
3. Трубина В. С., Сердюк О. А., Горлова Л. А. Экологическая стабильность и пластичность сортов горчицы сарептской яровой селекции ВНИИМК. Масличные культуры. 2024;(1(197)):40–44. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-1-197-40-44> EDN: CRFEYV
4. Выходцев В. А., Тулькубаева С. А., Тулаев Ю. В., Сомова С. В., Нугманов А. Б. Продуктивность горчицы сизой в зависимости от минерального питания и применения удобрений на черноземах южных Костанайской области. Наука и образование. 2023;(2–2(71)):221–228. DOI: <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-2-221-228> EDN: FNEZXC
5. Гущина В. А., Лыкова А. С., Прохорова Ю. А. Формирование урожайности сортов горчицы сарептской в зависимости от нормы высева в лесостепи Среднего Поволжья. Аграрный научный журнал. 2024;(10):4–11. DOI: <https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp4-11> EDN: ILKFLA
6. Huang H., Luo L., Huang L., Zhang J., Gikas P., Zhou Y. Effect of Manure Compost on Distribution of Cu and Zn in Rhizosphere Soil and Heavy Metal Accumulation by Brassica juncea. Water, Air, & Soil Pollution. 2020;231:195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04572-4>
7. Kamal M. A., Perveen K., Khan F., Sayyed R. Z., Hock O. G., Bhatt S. C. et al. Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of Brassica juncea L. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1228117. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1228117>
8. 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. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020;23:101489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489>
9. Broadley M. R., White P. J., Hammond J. P., Zelko I., Lux A. Zinc in plants. New Phytologist. 2007;173:677–702. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
10. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23779831> EDN: UAJSQV
11. 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. Environmental Challenges. 2021;4:100197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100197>
12. Ozturka L., Yazicia M. A., Yucelb C., Torunb A., Cekicc C., Bagecid A. et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. Physiologia Plantarum. 2006;128(1):144–152. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x>
13. Батова Ю. В., Лайдинен Г. Ф., Казнина Н. М., Титов А. Ф. Влияние загрязнения кадмием на рост и семенную продуктивность однолетних злаков. Агробиохимия. 2012;(6):79–83. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868493> EDN: ПВАКVN
14. Казнина Н. М., Задворная А. К., Батова Ю. В. Влияние избытка цинка на качество семян ячменя. Агробиохимия. 2021;(8):57–61. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121060065> EDN: MVMAFK
15. Николаева М. Г., Лянгузова И. В., Поздова Л. М. Биология семян. СПб: НИИ химии СПбГУ, 1999. 232 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/XbZ0nmM5az4OQ>
16. Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal C. E., Colville L. et al. Genome-wide association mapping and biochemical markers reveal that seed ageing and longevity are intricately affected by genetic background and developmental and environmental conditions in barley. Plant Cell & Environment. 2015;38(6):1011–1022. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12474>

17. Zinsmeister J., Leprince O., Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. *Biochemical Journal*. 2020;477(2):305–323. DOI: <https://doi.org/10.1042/BCJ20190165>
18. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 170 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19495991> EDN: QKQKGB
19. Алексейчук Г. Н., Ламан Н. А. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Минск: Право и экономика, 2005. 48 с. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318099496_Fiziologiceskoe_kacestvo_seman_selskoho_zajstvennyh_kultur_i_metody_ego_ocenki
20. Małacka A., Konkolewska A., Han'c A., Baralkiewicz D., Ciszewska L., Ratajczak E. et al. Insight into the Phytoremediation Capability of Brassica juncea (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. *International Journal Molecular Sciences*. 2019;20(18):4355. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20184355>
21. Liao Y., Li Z., Yang Z., Wang J., Li B., Zu Y. Response of Cd, Zn Translocation and Distribution to Organic Acids Heterogeneity in Brassica juncea L. *Plants*. 2023;12(3):479. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030479>
22. Glińska S., Gapińska M., Michlewska S., Skiba E., Kubicki J. Analysis of Triticum aestivum seedling response to the excess of zinc. *Protoplasma*. 2016;253:367–377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-015-0816-3>

References

1. Lukomets V. M., Zelentsov S. V., Krivoslikov K. M. Outlook and reserves the expansion of oil crops production in the Russian Federation. *Maslichniye kulturi. Nauchno-tekhnichesky byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnikh kultur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2015;(4(164)):81–102. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25304524>
2. Zhang X., Jia Q., Jia X., Li J., Sun X., Min L. et al. Brassica vegetables—an undervalued nutritional goldmine. *Horticulture Research*. 2025;12:uhae302. DOI: <https://doi.org/10.1093/hr/uhae302>
3. Trubina V. S., Serdyuk O. A., Gorlova L. A. Ecological stability and plasticity of spring brown mustard variety of VNIIMK breeding. *Maslichniye kulturi* = Oil crops. 2024;(1(197)):40–44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-1-197-40-44>
4. Vikhodtsev V. A., Tulkubayeva S. A., Tulayev Yu. V., Somova S. V., Nugmanov A. B. Productivity of mustard gray depending on mineral nutrition and the use of fertilizers on the chernozems of the southern Kostanay region. *Nauka i obrazovaniye*. 2023;(2–2(71)):221–228. (In Kazakhstan). DOI: <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-2-221-228>
5. Gushchina V. A., Lykova A. S., Prokhorova Yu. A. Yield formation of chinese mustard varieties depending on seeding rate in the forest-steppe of the Middle Volga region. *Agrarny nauchny zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(10):4–11. (In Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp4-11>
6. Huang H., Luo L., Huang L., Zhang J., Gikas P., Zhou Y. Effect of Manure Compost on Distribution of Cu and Zn in Rhizosphere Soil and Heavy Metal Accumulation by Brassica juncea. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04572-4>
7. Kamal M. A., Perveen K., Khan F., Sayyed R. Z., Hock O. G., Bhatt S. C. et al. Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of Brassica juncea L. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1228117. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1228117>
8. 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. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020;23:101489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489>
9. Broadley M. R., White P. J., Hammond J. P., Zelko I., Lux A. Zinc in plants. *New Phytologist*. 2007;173:677–702. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
10. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: *Karelsky nauchny tsentr RAN*, 2014. 194 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23779831>
11. 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. *Environmental Challenges*. 2021;4:100197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100197>
12. Ozturka L., Yazicia M. A., Yucelb C., Torunb A., Cekicc C., Bageid A. et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum*. 2006;128(1):144–152. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x>
13. Batova Yu. V., Laydinen G. F., Kaznina N. M., Titov A. F. Effect of cadmium on the growth and seed production of annual cereals. *Agrokimiya*. 2012;(6):79–83. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868493>
14. Kaznina N. M., Zadvornaya A. K., Batova Yu. V. Effect of zinc excess on seed quality of barley. *Agrokimiya*. 2021;(8):57–61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121060065>
15. Nikolayeva M. G., Lyanguzova I. V., Pozdova L. M. Biology of seeds. SPb: *NII khimii SPbGU*, 1999. 232 p. URL: <https://djvu.online/file/XbZ0nmM5az4OQ>

16. Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal C. E., Colville L. et al. Genome-wide association mapping and biochemical markers reveal that seed ageing and longevity are intricately affected by genetic background and developmental and environmental conditions in barley. *Plant Cell & Environment*. 2015;38(6):1011–1022.

DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12474>

17. Zinsmeister J., Leprince O., Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. *Biochemical Journal*. 2020;477(2):305–323. DOI: <https://doi.org/10.1042/BCJ20190165>

18. Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laydinen G. F. Plant resistance to heavy metals. Petrozavodsk: *Karelsky nauchny tsentr RAN*, 2007. 170 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19495991>

19. Alekseychuk G. N., Laman N. A. Physiological quality of seeds of agricultural crops and methods of its assessment. Minsk: *Pravo i ekonomika*, 2005. 48 p.

URL: https://www.researchgate.net/publication/318099496_Fiziologicheskoe_kachestvo_seman_selskohozyajstvennyh_kultur_i_metody_ego_ocenki

20. Małeczka A., Konkolewska A., Han'c A., Barałkiewicz D., Ciszewska L., Ratajczak E. et al. Insight into the Phytoremediation Capability of Brassica juncea (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. *International Journal Molecular Sciences*. 2019;20(18):4355. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20184355>

21. Liao Y., Li Z., Yang Z., Wang J., Li B., Zu Y. Response of Cd, Zn Translocation and Distribution to Organic Acids Heterogeneity in Brassica juncea L. *Plants*. 2023;12(3):479. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030479>

22. Glińska S., Gapińska M., Michlewska S., Skiba E., Kubicki J. Analysis of Triticum aestivum seedling response to the excess of zinc. *Protoplasma*. 2016;253:367–377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-015-0816-3>

Вклад авторов: Kaznina N. M. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Kholoptseva E. S., Batova Yu. V. – анализ данных, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Казнина Наталья Мстиславовна**, доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3092-563X>

Холопцева Екатерина Станиславовна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-3651>

Батова Юлия Валерьевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3804-8651>

Author contributions: Kaznina N. M. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Kholoptseva E. S., Batova Yu. V. – data analysis, manuscript preparation.

Information about the authors

✉ **Natalia M. Kaznina**, DSc in Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3092-563X>

Ekaterina S. Kholoptseva, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2280-3651>

Yulia V. Batova, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3804-8651>

✉ – Для контактов / Corresponding author