

УДК 546.47:581.1:631.524.84:633.844

## ВЛИЯНИЕ ЦИНКА НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ГОРЧИЦЫ САРЕПТСКОЙ<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. М. Казнина<sup>1</sup>, Ю. В. Батова<sup>1</sup>, Е. С. Холопцева<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии – обособленное подразделение  
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр РАН”  
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

\*E-mail: [holoitseva@krc.karelia.ru](mailto:holoitseva@krc.karelia.ru)

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 17.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В лабораторных условиях изучено влияние цинка в концентрациях 5 (контроль), 15, 30 и 45 мг/кг субстрата на рост, фотосинтетический аппарат и продуктивность растений *Brassica juncea* сорта Славянка. Обнаружено, что цинк в изученных концентрациях тормозил линейный рост корня и побега, а также накопление сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов. При этом рост побега ингибировался в большей степени, чем корня. Помимо этого при использовании цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата значительно снижалась площадь семядольных и настоящих листьев, что приводило к уменьшению (по сравнению с контролем) общей листовой поверхности. При этом снижение содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилла *b* и каротиноидов) и устьичной проводимости, а также замедление скорости фотосинтеза наблюдали лишь при использовании наибольшей концентрации металла. Более низкие концентрации цинка или не влияли на изученные показатели фотосинтетического аппарата, или даже оказывали стимулирующий эффект на некоторые из них. На основании анализа данных литературы и проведенного исследования сделан вывод о том, что ответные реакции и продуктивность растений горчицы сарептской зависели не только от концентрации цинка в корнеобитаемой среде, но и во многом от условий проведения эксперимента.

**Ключевые слова:** горчица сарептская *Brassica juncea* L. (Czern.), цинк, рост, фотосинтетический аппарат, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188122120067

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных загрязнителей окружающей среды среди тяжелых металлов (ТМ) является цинк. Повышение его содержания в почве связано с выбросами промышленных предприятий, активной работой автомобильного и железнодорожного транспорта, а также с использованием в сельском хозяйстве большого числа минеральных удобрений и химических средств защиты от болезней и вредителей, которые находят все более широкое применение [1–3]. В результате в отдельных регионах содержание цинка в почве, в том числе на территориях, занятых под сельскохозяйственные культуры, может в десятки и даже сотни раз превышать его среднее содержание [3–5]. Поскольку доступность цинка для растений очень высока [6], повышение уровня его

содержания в окружающей среде приводит к накоплению металла в органах растений, что негативно отражается на их жизнедеятельности и продуктивности, а также является причиной ухудшения качества получаемой продукции [7]. Вследствие этого во многих регионах мира уделяется повышенное внимание разработке различных методов очистки и восстановления загрязненных цинком земель. Одной из перспективных и экономически выгодных технологий, направленных на очистку почвы от избытка цинка, считается фиторемедиация [8]. Однако для ее успешного использования требуется тщательный отбор видов растений, устойчивых к этому металлу и способных накапливать его в больших количествах в надземных органах. Горчица сарептская *Brassica juncea* (L.) Czern., по мнению ряда авторов, является перспективным для использования в фиторемедиации видом. Она обладает высокой металлоустойчивостью и способна произрастать на почвах с высоким содержанием цинка, накоп-

<sup>1</sup> Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2022-0004).

ливая при этом металл в побегах в довольно больших количествах [9, 10]. Однако в исследованиях других авторов, наоборот, отмечена ее чувствительность к избытку цинка [11, 12], а также о более низком фиторемедиационном потенциале этого вида [13], в том числе в сравнении с другими представителями семейства Brassicaceae, такими, например, как *B. carinata*, *B. oleracea* [14] или *B. napus* [15].

Известно, что хорошими критериями устойчивости растений к высоким концентрациям ТМ в окружающей среде являются показатели, характеризующие активность физиологических процессов в них, однако такого рода данных в отношении влияния избытка цинка на растения *B. juncea* крайне мало. Исходя из этого, цель работы — изучение влияния повышенных концентраций цинка на рост, активность фотосинтетического аппарата и продуктивность растений горчицы сарептской.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Семена горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.) сорта Славянка были предоставлены Отделом генетических ресурсов масличных и прядильных культур Федерального исследовательского центра “Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова”. Опыты проводили в сосудах с песком (объем 800 мл). Сульфат цинка добавляли перед посевом, предварительно растворив в 100 мл дистиллированной воды, в концентрациях (по элементу) 5 (контроль), 15, 30 и 45 мг/кг субстрата. Семена горчицы, предварительно замоченные в дистиллированной воде на 1 сут, высевали в сосуды по 10 шт. в каждый. Растения выращивали под светоустановкой при температуре 22°C, относительной влажности воздуха 60–70%, ФАР 200 мкмоль/(м<sup>2</sup> с), 14-часовом фотопериоде. Полив осуществляли питательным раствором Хогланда–Арнона, не содержащим цинка.

Анализ растений проводили спустя 30 сут после посева. У контрольных и опытных растений измеряли длину корня и высоту побега. Воздействие цинка на фотосинтетический аппарат (ФСА) оценивали по изменению у опытных растений по сравнению с контрольными площади семядольных и настоящих листьев, общей листовой поверхности, содержания фотосинтетических пигментов, устьичной проводимости и скорости фотосинтеза. Помимо этого, определяли продуктивность растений на основании накопления сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов.

Площадь листовых пластинок определяли с помощью программы AreaS 2.1. Фотосинтетические пигменты экстрагировали 96%-ным этанолом, содержание хлорофиллов и каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом (спектрофотометр СФ-2000, Россия) [16]. Интенсивность фотосинтеза и устьичную проводимость измеряли с помощью портативной системы для исследования CO<sub>2</sub>-газообмена и водяных паров (НСМ-1000, Германия). Сухую биомассу определяли весовым методом, высушивая образцы в термостате при 105°C.

Каждый вариант опыта состоял из 4-х повторностей. При измерении показателей роста и продуктивности растений биологическая повторность в пределах одного варианта опыта составляла 10 растений, при определении показателей активности ФСА — 5 растений. Аналитическая повторность трехкратная. Опыт повторяли дважды. Результаты экспериментов обработаны с помощью методов вариационной статистики с использованием программы Excel. О достоверности различий судили с помощью *t*-критерия Стьюдента при  $p < 0.05$ .

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Влияние цинка на линейный рост растений Brassica juncea.* Показатели роста растений являются хорошими критериями оценки их металлоустойчивости. В ряде работ указывали на уменьшение ростовых параметров растений горчицы сарептской в присутствии избытка цинка в корнеобитаемой среде [17, 18]. В наших опытах цинк в изученных концентрациях также тормозил линейный рост корня и побега горчицы. Например, в присутствии металла в концентрациях 15 и 30 мг/кг субстрата длина корня была в 1.5 раза меньше, чем у растений контрольного варианта, а высота побега — почти в 2 раза. Дальнейшее повышение концентрации металла (до 45 мг/кг) приводило к еще более сильному снижению этих показателей, которые оказались в 4 раза меньше, чем у контрольных растений (табл. 1). Важно отметить, что при использовании металла в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата высота побега снижалась в большей степени, чем длина корня. Возможно, это было связано с более высоким содержанием цинка в надземных органах, что характерно для этого вида растений [10, 18]. Отрицательное воздействие цинка на линейный рост

**Таблица 1.** Влияние цинка на длину корня и высоту побега растений *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Длина корня, см	14.4 ± 0.8	10.2 ± 1.4*	9.9 ± 1.7*	3.2 ± 0.2*
Высота побега, см	23.2 ± 1.5	11.8 ± 1.8*	10.3 ± 5.2*	5.5 ± 0.2*

\*Различия с контролем статистически значимы при  $p < 0.05$ . То же в табл. 2–4.

**Таблица 2.** Влияние цинка на площадь листьев (см<sup>2</sup>) и общую листовую поверхность *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Семядольный лист	2.83 ± 0.20	2.39 ± 0.18	1.36 ± 0.08*	0.99 ± 0.10*
1-й настоящий лист	15.6 ± 1.5	14.9 ± 0.2	4.01 ± 0.05*	1.09 ± 0.02*
2-й настоящий лист	14.1 ± 1.5	10.9 ± 1.4	2.55 ± 0.04*	0.83 ± 0.01*
3-й настоящий лист	9.57 ± 0.89	11.8 ± 0.4*	1.92 ± 0.02*	0.62 ± 0.01*
4-й настоящий лист	7.03 ± 0.61	4.57 ± 0.05*	1.14 ± 0.01*	–
Общая листовая поверхность	50.1 ± 7.3	48.9 ± 5.4	10.5 ± 1.6*	4.11 ± 0.49*

корня и побега можно объяснить его прямым воздействием на деление и растяжение клеток. В частности, обнаружено, что под действием металла снижалась жизнеспособность клеток меристемы корня [17], уменьшение их размеров, замедление интенсивности клеточных делений [19]. Воздействие цинка на растяжение клеток, как правило, связывают с нарушением проницаемости мембран и снижением эластичности клеточных стенок вследствие нарушения структуры микротрубочек [20]. Нельзя исключить и опосредованное действие высоких концентраций цинка на рост растений из-за замедления скорости фотосинтеза, нарушения водного обмена и/или минерального питания [21].

*Влияние цинка на ФСА растений Brassica juncea.* Важным показателем, определяющим фотосинтетический потенциал растений, является площадь листьев и общая листовая поверхность. В наших опытах цинк в концентрации 15 мг/кг субстрата не оказывал ярко выраженного отрицательного воздействия на размеры семядольных и настоящих листьев горчицы, тогда как при более высоких концентрациях металла размеры листьев опытных растений были меньше, чем контрольных. При этом ингибирование цинком размеров настоящих листьев было выражено в большей степени, чем семядольных. Например, площадь семядольных листьев при воздействии цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата оказалась меньше, чем в контроле в 2 и 3 раза соответственно, а площадь первой и второй пар настоящих листьев – в 4–10 раз (табл. 2). В результате общая

листовая поверхность растений в опытных вариантах с использованием цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг была значительно меньше (в 5 и 12 раз соответственно), чем в контрольном варианте.

Уменьшение размеров листьев горчицы сарептской было обнаружено ранее и другими авторами, в частности, при концентрации цинка 300 мкМ [17]. Среди возможных причин этого можно указать снижение количества и размеров паренхимных и эпидермальных клеток, уменьшение размера межклеточного пространства, что ранее было обнаружено и у горчицы сарептской [9]. Кроме того, к снижению площади листьев могло привести и отрицательное воздействие цинка на физиологические процессы, в том числе водный обмен, минеральное питание, фотосинтез.

Известно, что поддержание необходимой скорости фотосинтеза во многом зависит от содержания фотосинтетических пигментов, что особенно важно в стрессовых условиях. В наших опытах в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата общее содержание хлорофиллов и каротиноидов возрастало по сравнению с контролем (табл. 3). При этом соотношение хлорофиллов ( $a : b$ ) сохранялось на уровне контроля. При использовании металла в концентрации 30 мг/кг содержание пигментов значимо не изменялось, хотя наблюдали некоторое увеличение соотношения хлорофиллов по сравнению с контролем. Дальнейшее повышение концентрации цинка до 45 мг/кг не влияло на содержание хлорофилла  $a$ , но вызывало значительное уменьше-

**Таблица 3.** Влияние цинка на содержание фотосинтетических пигментов в тканях 1-го настоящего листа растений *Brassica juncea* сорта Славянка

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сырой массы	0.287 ± 0.042	0.468 ± 0.029*	0.336 ± 0.011	0.327 ± 0.011
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сырой массы	0.134 ± 0.021	0.199 ± 0.026*	0.128 ± 0.006	0.078 ± 0.006*
Общее содержание хлорофиллов ( <i>a</i> + <i>b</i> )	0.421 ± 0.062	0.667 ± 0.054*	0.464 ± 0.017	0.405 ± 0.016
Соотношение хлорофиллов ( <i>a</i> : <i>b</i> )	2.16 ± 0.04	2.46 ± 0.17	2.64 ± 0.08*	4.30 ± 0.24*
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы	0.091 ± 0.004	0.135 ± 0.008*	0.091 ± 0.003	0.056 ± 0.004*

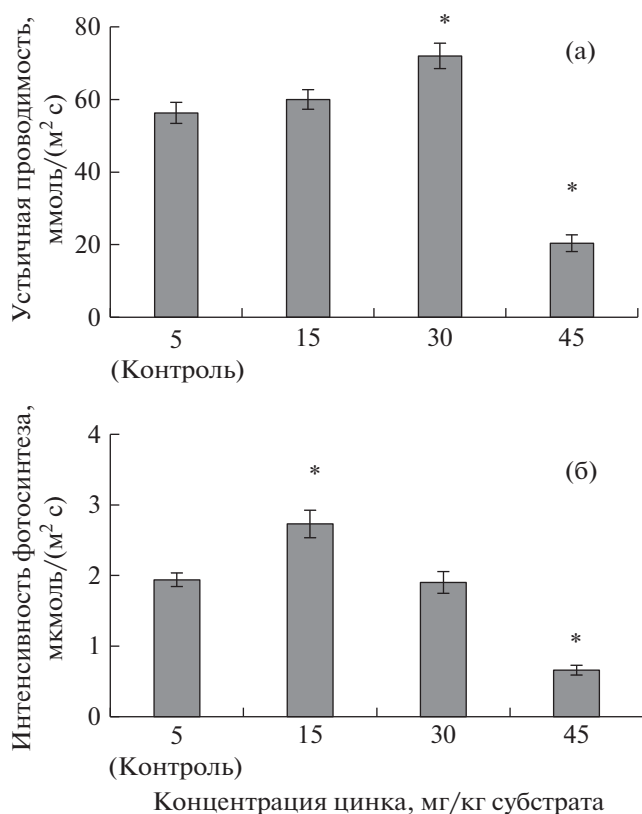
ние количества каротиноидов, а также хлорофилла *b*, что приводило к возрастанию отношения хлорофиллов *a* : *b*.

О преимущественном снижении у горчицы сарептской хлорофилла *b* при воздействии цинка в высоких концентрациях указывали ранее и другие авторы [22, 23]. С чем это связано, до конца не ясно, но в литературе имеются сведения о снижении под действием металла активности хлорофилла *a* оксигеназы – фермента, участвующего в биосинтезе хлорофилла *b* из хлорофилла *a* [23].

Важным показателем сбалансированности фотосинтетического процесса является соотношение хлорофиллов. Поскольку хлорофилл *a* связан с реакционными центрами фотосистем, а хлорофилл *b* – со светособирающими комплексами, увеличение соотношения *a* : *b* свидетельствует об уменьшении светопоглощения [24] и может являться причиной замедления скорости фотосинтеза. Подобный эффект в условиях загрязнения почв ТМ отмечен у многих видов растений, в том числе у горчицы сарептской [25]. Есть мнение, что такая реакция является адаптивной и характерна для более устойчивых к загрязнению видов растений, тогда как у менее устойчивых величина этого соотношения снижается [26].

Большое влияние на скорость фотосинтетических процессов оказывает и степень открытия устьиц. Проведенное нами исследование показало, что у горчицы сарептской при воздействии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата значимых изменений устьичной проводимости не наблюдали (рис. 1а). Более высокая концентрация металла (30 мг/кг субстрата) приводила к росту величины этого показателя по сравнению с контролем, что, очевидно, было связано с увеличением размеров устьичной щели и направлено на усиление поглощения углекислого газа для поддержания необходимой скорости фотосинтеза в этих условиях. Цинк в концентрации 45 мг/кг субстрата, наоборот, вызывал резкое снижение устьичной проводимости почти в 3 раза по сравнению с контролем, указывая на частичное закрытие устьиц. Подобный эффект цинка наблюдали и другие авторы [27, 28]. Предполагается, что это может быть вызвано возрастанием количества абсцизовой кислоты и/или изменением регуляции  $K^+$ -каналов в замыкающих клетках [29, 30].

Обнаруженные нами изменения показателей ФСА у растений в зависимости от концентрации цинка в корнеобитаемой среде отразились и на скорости фотосинтеза. Например, при концен-



**Рис. 1.** Влияние цинка на устьичную проводимость (а) и скорость фотосинтеза (б) растений *Brassica juncea* сорта Славянка.

**Таблица 4.** Влияние цинка на накопление подземной и надземной биомассы растениями *Brassica juncea* сорта Славянка, г/растение

Показатель	Концентрация цинка, мг/кг субстрата			
	5 (контроль)	15	30	45
Сырая биомасса корней	1.02 ± 0.21	0.75 ± 0.14	0.12 ± 0.02*	0.06 ± 0.02*
Сухая биомасса корней	0.055 ± 0.010	0.050 ± 0.005	0.009 ± 0.001*	0.007 ± 0.002*
Сырая биомасса побега	2.57 ± 1.28	1.66 ± 0.24	0.33 ± 0.04*	0.11 ± 0.01*
Сухая биомасса побега	0.237 ± 0.036	0.204 ± 0.026	0.029 ± 0.004*	0.014 ± 0.002*

трации металла 15 мг/кг субстрата скорость процесса возрастала (в 1.5 раза) по отношению к контролю, при 30 мг/кг – оставалась на уровне контроля, а при 45 мг/кг – оказалась почти в 3 раза меньше, чем в контроле (рис. 1б).

В литературе имеются данные как об увеличении скорости фотосинтеза у растений в присутствии цинка [31, 32], так и о его замедлении [31, 33–35]. Как и в нашем опыте это в большинстве случаев зависело от концентрации металла в корнеобитаемой среде и определялось целым рядом изменений активности ФСА, происходивших на разных уровнях организации. Обнаруженное нами увеличение скорости фотосинтеза в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата, вероятно, явилось следствием повышения содержания в листьях фотосинтетических пигментов. Поддержание необходимого уровня этого процесса в условиях действия металла в концентрации 30 мг/кг субстрата обеспечивалось необходимым уровнем хлорофилла *a* и каротиноидов и увеличением устьичной проводимости. Значительное замедление скорости фотосинтеза при наибольшей концентрации металла во многом было связано со снижением содержания хлорофилла *b* и каротиноидов, уменьшением размеров устьичной щели, что, вероятно, приводило к ухудшению светопоглощения и газообмена.

*Влияние цинка на продуктивность растений Brassica juncea.* Известно, что накопление биомассы растениями в условиях действия высоких концентраций ТМ является показателем их металлоустойчивости и одним из необходимых условий для использования конкретного вида в фиторемедиации загрязненных ТМ почв. В нашем опыте в присутствии цинка в концентрации 15 мг/кг субстрата достоверного снижения (по отношению к контролю) сырой и сухой биомассы корней и побегов не происходило, тогда как более высокие концентрации металла оказывали ингибирующее действие на эти показатели (табл. 4). Например, в присутствии цинка в концентрации 30 мг/кг субстрата сырая и сухая биомасса корня

были меньше, чем у контрольных растений в 7 и 6 раз соответственно, а при концентрации металла 45 мг/кг субстрата – в 17 и 8 раз. Накопление надземной биомассы ингибировалось цинком в еще большей степени, чем корней. В частности, сырая биомасса побега при воздействии металла в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата снижалась по сравнению с контролем в 8 и 23 раза, сухая – в 8 и 17 раз соответственно.

Имеющиеся в литературе данные о продуктивности горчицы сарептской в условиях высоких концентраций цинка в корнеобитаемой среде весьма противоречивы. В одних исследованиях уменьшение (более чем в 2 раза) биомассы побега наблюдали уже в присутствии цинка в концентрации 50 мг/л [17], тогда как в работе других авторов значимого изменения сырой и сухой надземной биомассы не наблюдали даже при концентрации металла 147 мг/кг субстрата [14]. Одной из причин таких различий является, на наш взгляд, разница в устойчивости к цинку разных сортов, а также в условиях постановки экспериментов. Например, в условиях водной культуры более низкие концентрации металла приводят к сильному отрицательному эффекту цинка на растения по сравнению с опытами с использованием почвы. В наших опытах снижение биомассы горчицы сарептской обнаруживалось при действии цинка в концентрациях 30 и 45 мг/кг субстрата, что во многом было связано с торможением роста корня и побега уже на ранних этапах роста растений, а также с уменьшением размеров листьев. Ярко выраженное негативное действие металла в использованных концентрациях, вероятно, объясняется внесением соли цинка в виде раствора, при котором растения горчицы, как гипераккумуляторы, легко поглощают цинк в растворимой форме и накапливают его в органах в относительно больших количествах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании анализа данных литературы и проведенного исследования можно

сделать вывод о том, что рост, активность ФСА и продуктивность *B. juncea* зависели от концентрации цинка в корнеобитаемой среде, а также от условий проведения эксперимента. При внесении соли цинка в виде раствора в песчаный субстрат металл в концентрации 15 мг/кг субстрата тормозил линейный рост растений, но не сказывался отрицательно на ФСА и продуктивности растений. При дальнейшем повышении концентрации металла до 30 мг/кг помимо замедления роста корня и побега уменьшалась площадь листьев и общая листовая поверхность, что отразилось на биомассе растений, однако скорость фотосинтеза в этих условиях сохранялась на уровне контроля. Цинк в концентрации 45 мг/кг оказывал сильное негативное влияние как на рост, так и на ФСА растений, что в итоге привело к значительному снижению их продуктивности. Сравнение полученных результатов с данными других исследователей показало, что для рекомендации использования сортов *B. juncea* в фиторемедиации загрязненных цинком почв необходимо проведение опытов в разных условиях, при этом важно учитывать доступную для растений концентрацию металла в почве конкретных территорий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Основные черты биохимии цинка и кадмия // Цинк и кадмий в окружающей среде. М.: Наука, 1992. С. 7–18.
2. McGrath S.P., Loveland P.J. Soil geochemical atlas of England and Wales. London: Blackie and Sons, 1992. 101 p.
3. Mertens J., Smolders E. Zinc // Heavy metals in soils: trace metals and metalliodes in soils and their bioavailability / Ed. V.J. Alloway. Dordrecht: Springer, 2013. P. 465–493.
4. Царева М.В., Персикова Т.Ф. Виды загрязняющих химических веществ // Нейтрализация загрязнения почв / Под. ред. Ю.А. Мажайского. Рязань, 2008. С. 37–59.
5. Tedoldi D., Charafeddine R., Branchu P., Thomas E., Gromaire M.-C. Intra- and inter-site variability of soil contamination in road shoulders – Implications for maintenance operations // Sci. Total Environ. (in press). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144862.hal-03097956>
6. Алексеева-Попова Н.В., Моченят К.И. Внутрипопуляционные различия реакции *Salvia stepposa* на избыток цинка в среде // Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. Л.: Бот. Ин-т РАН, 1991. 215 с.
7. Тутов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 170 с.
8. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 768–780.
9. Maruthi Sridhar B.B., 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. V. 54. P. 131–141.
10. 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 // Biocatalys. Agricult. Biotechnol. V. 23. P. 101489. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489>
11. Marchiol L., Assolari S., Sacco P., Zerbi G. Phytoextraction of heavy metals by canoa (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus satives*) growth on multicontaminated soil // Environ. Pollut. 2004. V. 132. P. 21–27.
12. Adediran G.A., Ngwenya B.T., Mosselmans J.F.W., Heal K.V., Harve B.A. Mechanisms behind bacteria induced plant growth promotion and Zn accumulation in *Brassica juncea* // J. Hazard. Mater. 2015. V. 283. P. 490–499.
13. Cui E., Cui B., Fan X., Li S., Gao F. Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) intercropping can improve the phytoremediation of antibiotics and antibiotic resistance genes but not heavy metal // Sci. Total Environ. 2021. V. 784. 147093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147093>
14. Gisbert C., Clemente R., Navarro-Avino J., Baixauli C., Giner A., Serrano R., Walker D.J., Bernal M.P. Tolerance and accumulation of heavy metals by Brassicaceae species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain // Environ. Exp. Bot. 2006. V. 56. P. 19–27.
15. Feigl G., Kumar D., Lehotai N., Tugyi N., Molnár Á., Ördög A., Szepesi Á., Gémes K., Laskay G., Erdei L., Kolbert Z. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 94. P. 179–189.
16. Wintermans J.F.G.M., De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenoxyphytins in ethanol // Biochimica et Biophysica Acta. 1965. V. 109. P. 448–453.
17. Feigl G., Kolbert 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. V. 125. P. 141–152.
18. Chowardhara B., Borgohain P., Saha B., Awasthi J.P., Moulick D., Panda S.K. Assessment of phytotoxicity of zinc on Indian mustard (*Brassica juncea*) varieties during germination and early seedling growth // Ann. Plant Soil Res. 2019. V. 21(3). P. 239–244.
19. Довгалюк А.И., Калиняк Т.Б., Блюм Я.Б. Цитогенетические эффекты солей токсичных металлов в клетках апикальной меристемы корней проростков *Allium cepa* L. // Цитология и генетика. 2001. Т. 35. № 2. С. 3–10.
20. Иванов В.Б., Быстрова Е.И., Серегин И.В. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в

- связи с проблемой специфичности и избирательности их действия // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 3. С. 445–454.
21. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние цинка на продуктивность ярового ячменя в вегетационном опыте // Агрохимия. 2010. № 8. С. 72–76.
  22. Ebbs S.D., Kochian L.V. Toxicity of zinc and copper to *Brassica* species: Implications for phytoremediation // J. Environ. Qual. 1997. V. 26. P. 776–781.
  23. Ebbs S., Uchil S. Cadmium and zinc induced chlorosis in Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern) involves preferential loss of chlorophyll *b* // Photosynthetica. 2008. V. 46. № 1. P. 49–55.
  24. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Фотосинтез // Физиология растений: учебник для студ. вузов / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр “Академия”, 2005. С. 108–211.
  25. Singh P.K., Tewari R.K. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants // J. Environ. Biol. 2003. V. 24. P. 107–112.
  26. Николаевский В.С. Биологические основы газостойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
  27. Sagardoy R., Morales F., López-Millán A.F., Abadía A., Abadía J. Effects of zinc toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics // Plant Biol. 2009. V. 11 (3). P. 339–350. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x>
  28. Shi G.R., Cai Q.S. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to zinc stress // Biol. Plantarum. 2009. V. 53. P. 391–394.
  29. Bishnoi N.R., Sheoran I., Singh R. Influence of cadmium and nickel on photosynthesis and water relations in wheat leaves of different insertion level // Photosynthetica. 1993. V. 28. № 3. P. 473–479.
  30. Perfus-Barbeoch L., Leonhardt N., Vavasour A., Forestier C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status // Plant J. 2002. V. 32. P. 539–548.
  31. Subba P.B., Mukhopadhyay M., Mahato S.K., Bhutia K.D., Mondal T.K., Ghosh S.K. Zinc stress induces physiological, ultra-structural and biochemical changes in mandarin orange (*Citrus reticulata* Blanco) seedlings // Physiol. Mol. Biol. Plant. 2014. V. 20. № 4. P. 461–473. <https://doi.org/10.1007/s12298-014-0254-2>
  32. Liu J.-P., Deng Q.-J., Shang Y.-J., Yao X.-W., Wang H.-K., Tang Y.-J., Peng F.-R., Tan P.-P. Effects of zinc application on the growth and photosynthetic characteristics of pecan at the seedling stage // Plant Biol. 2021. V. 23. P. 1149–1156. <https://doi.org/10.1111/plb.13307>
  33. Kaznina N.M., Titov A.F. Effect of zinc deficiency and excess on the growth and photosynthesis of winter wheat // J. Stress Physiol. Biochem. 2017. V. 13. № 4. P. 88–94.
  34. Khan H.R., McDonald G.K., Rengel Z. Zinc fertilization and water stress affects plant water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arietinum* L.) // Plant and Soil. 2004. V. 267. P. 271–284.
  35. Szopinski M., Sitko K., Giero Z., Rusinowski S., Corso M., Hermans C., Verbruggen N., Małkowski E. Toxic effects of Cd and Zn on the photosynthetic apparatus of the *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis arenosa* pseudo-metallophytes // Front. Plant Sci. 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00748>

## Effect of Zinc on the Physiological Parameters and Productivity of Sarepta Mustard Plants

N. M. Kaznina<sup>a</sup>, Yu. V. Batova<sup>a</sup>, and E. S. Kholoptseva<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Biology – a separate division of the Federal Research Center “Karelian Scientific Center of the RAS”  
Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk 185910, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: kholoptseva@krc.karelia.ru*

The effect of zinc in concentrations of 5 (control), 15, 30 and 45 mg/kg of substrate on the growth, photosynthetic apparatus and productivity of *Brassica juncea* plants of the Slavyanka variety was studied in laboratory conditions. It was found that zinc in the studied concentrations inhibited the linear growth of root and shoot, as well as the accumulation of raw and dry biomass of underground and aboveground organs. At the same time, the growth of the shoot was inhibited to a greater extent than the root. In addition, when zinc was used at concentrations of 30 and 45 mg/kg of the substrate, the area of cotyledon and true leaves was significantly reduced, which led to a decrease (compared with the control) of the total leaf surface. At the same time, a decrease in the content of photosynthetic pigments (chlorophyll *b* and carotenoids) and stomatal conductivity, as well as a slowdown in the rate of photosynthesis were observed only when using the highest concentration of metal. Lower zinc concentrations either did not affect the studied parameters of the photosynthetic apparatus, or even had a stimulating effect on some of them. Based on the analysis of literature data and the conducted research, it was concluded that the responses and productivity of Sarepta mustard plants depended not only on the concentration of zinc in the root environment, but also largely on the conditions of the experiment.

*Key words:* Sarepta mustard *Brassica juncea* L. (Czern.), zinc, growth, photosynthetic apparatus, productivity.