

ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТКА ЦИНКА НА КАЧЕСТВО СЕМЯН ЯЧМЕНЯ¹

© 2021 г. Н. М. Казнина^{1,*}, А. К. Задворная², Ю. В. Батова¹

¹ Институт биологии — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
“Карельский научный центр РАН”

195910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

² Петрозаводский государственный университет
195910 Петрозаводск, просп. Ленина, 33, Россия

*E-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 11.11.2020 г.

После доработки 17.12.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Изучено влияние цинка в оптимальной (20 мг/кг субстрата) и высокой (160 мг/кг субстрата) концентрации на качество сформированных в этих условиях семян ячменя сорта Нур. Обнаружено, что избыток цинка в субстрате приводил к ухудшению качества семян, о чем свидетельствовала меньшая (по сравнению с семенами, сформированными в оптимальных условиях минерального питания) масса 1000 семян, более низкая энергия прорастания и всхожесть, слабый начальный рост проростков, а также их меньшая устойчивость к высокой (20 мМ) концентрации металла. Предполагается, что причинами снижения качества семян в этих условиях являются нарушения в материнских растениях физиологических процессов, влияющих на формирование зерновки и накопление необходимых питательных веществ в семени, и/или прямое воздействие ионов цинка на зародыш семени.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., избыток цинка, качество семян, жизнеспособность семян, сила роста семян.

DOI: 10.31857/S0002188121060065

ВВЕДЕНИЕ

Получение высоких урожаев хлебных злаков невозможно без хорошего посевного материала. Однако посевные качества семян могут ухудшаться вследствие нарушения сроков или режима их хранения, а также из-за неблагоприятных условий окружающей среды, действующих при их формировании [1]. Например, известно, что при воздействии на материнские растения засухи, низкой и высокой температуры или при недостатке элементов минерального питания, формируются семена низкого качества, характеризующиеся невысокой всхожестью и замедленным начальным ростом проростков. В конечном итоге это приводит к снижению продуктивности растений и потере урожая [2–4].

Среди факторов внешней среды, влияющих на растения, определяющую роль играет режим минерального питания, предполагающий сбалансированное содержание в почве макро- и микроэлементов. Цинк является одним из наиболее важ-

ных микроэлементов для растений вследствие большого числа разнообразных функций, которые он выполняет в растительной клетке [5]. Поэтому его недостаток в почве отрицательно сказывается на жизнедеятельности растений. Учитывая, что во многих регионах мира почвы, используемые под сельскохозяйственные культуры, имеют дефицит этого микроэлемента или характеризуются его низкой доступностью, цинк регулярно в больших количествах вносят в почву с минеральными удобрениями. Это приводит к значительному повышению содержания металла в почве до уровня, токсичного для растительных организмов. Отрицательное воздействие высоких концентраций цинка на физиологические процессы культурных злаков хорошо известно. При избытке металла тормозится рост растений, замедляется их развитие, снижается интенсивность фотосинтеза и дыхания, нарушается водный обмен и минеральное питание [6–9]. Сведений о влиянии высоких концентраций цинка на формирование семян и их посевные качества крайне мало. Вместе с тем известно, что избыток некоторых химических элементов из группы тяжелых

¹ Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (тема № 0218-2019-0074).

Таблица 1. Влияние содержания цинка в субстрате на количество и биомассу семян на главном побеге растений ячменя сорта Нур

Вариант	Количество семян, шт./побег	Масса семян, г/побег	Масса 1000 семян, г
Zn 20	16.8 ± 0.5	0.76 ± 0.03	47.0 ± 1.1
Zn 160	13.8 ± 0.8	0.49 ± 0.04*	36.5 ± 1.4*

*Различия с контролем достоверны при $p < 0.05$. То же в табл. 2, 3.

металлов (ТМ), к которым относится и цинк, оказывает негативное воздействие на элементы семенной продуктивности и урожай семян [10–12]. Исходя из вышеизложенного, цель работы – изучение качества семян ячменя, формирование которых проходило в условиях оптимального или высокого содержания цинка в субстрате.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В опыте использовали семена ярового ячменя сорта Нур, сформированные при оптимальном (20 мг/кг субстрата) содержании цинка в субстрате или при его избытке (160 мг Zn/кг субстрата). Материнские растения выращивали в вегетационных сосудах с песком объемом 10 л при плотности посева 10 растений/сосуд. Уборку урожая проводили в фазе восковой спелости семян. При этом считали количество семян, сформированных на колосе главного побега, и определяли их массу. По завершении периода покоя в лабораторных условиях проводили оценку качества семян. Для этого определяли массу 1000 семян, а также изучали жизнеспособность и силу роста семян. Жизнеспособность семян оценивали на основании энергии прорастания и лабораторной всхожести. Силу роста семян определяли по ряду показателей начального роста проростков (длина корня и побега, площадь листовой пластинки 1-го листа, сырая и сухая биомасса проростков) и их устойчивости к высокой (провокационной) концентрации цинка (20 мМ). Данная концентрация, ингибирующая рост проростков ячменя более чем на 50%, была выбрана на основании предварительных опытов.

Проращивание семян проводили в четырехкратной повторности по 25 семян в каждой в чашке Петри при температуре 22°C на воде или на растворе сернокислого цинка с концентрацией 20 мМ. Энергию прорастания и всхожесть определяли по доле проросших семян (% проросших семян на 3-и и 7-е сут соответственно по ГОСТу № 12038-84). При изучении морфометрических показателей биологическая повторность составляла 20 проростков. Площадь листа вычисляли по фор-

муле: $S = 2/3ld$, где l – длина листа, d – ширина листа [13]. Сухую биомассу определяли весовым методом, высушивая образцы в термостате при 105°C.

В таблицах представлены средние и их стандартные ошибки. Анализ данных проводили с использованием пакета анализа данных Microsoft Excel. О достоверности различий судили по t -критерию Стьюдента при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что избыток цинка в субстрате не оказывал влияния на количество семян, сформированных на колосе главного побега ячменя, однако заметно снижал их посевные качества. В частности, масса семян с одного колоса, а также масса 1000 семян у растений, выращенных при избытке цинка, оказались заметно меньше (на 36 и 23% соответственно), чем у растений, выращенных при оптимальной концентрации металла (табл. 1).

Показатель “масса 1000 семян”, как известно, является одним из основных параметров при оценке качества семян [14, 15]. Несмотря на то что масса зерновки у злаков относится к признакам, имеющих высокий коэффициент наследуемости, доказано, что неблагоприятные факторы окружающей среды могут оказывать негативное влияние на этот показатель [16–18]. В частности, обнаружено снижение массы 1000 семян при выращивании материнских растений в условиях недостаточной влагообеспеченности субстрата [15], при высоких дневных температурах [19] и низких среднесуточных температурах [18]. Поскольку показатель “масса 1000 семян” характеризует запас питательных веществ в семенах, его уменьшение при формировании семян в стрессовых условиях, в том числе и при избытке цинка, свидетельствует об уменьшении количества необходимых для формирования зародыша веществ.

К важным критериям качества семян относится и их жизнеспособность, основными показателями которой являются энергия прорастания и всхожесть семян [20]. В нашем опыте энергия прорастания и всхожесть семян, сформированных при избытке цинка в субстрате, составили 68 и 76% соответственно, что было значительно меньше, чем у семян, которые сформировались в оптимальных условиях минерального питания (91 и 100% соответственно). Снижение жизнеспособности семян при их формировании в неблагоприятных условиях минерального питания материнских растений также отмечено в работах других авторов [21, 22]. Среди возможных причин этого указывали снижение в эндосперме содержания некоторых питательных веществ, например, сахаров и вто-

ричных метаболитов, изменения в химическом составе оболочки семян и нарушение ее проницаемости, а также увеличение в клетках зародыша количества активных форм кислорода (АФК) и развитие окислительного стресса [23, 24].

Помимо жизнеспособности семян, для оценки их качества используют критерий “сила роста семян”. Определение силы роста семян включает в себя изучение развития морфологических органов проростков на начальных этапах их роста, а также определение устойчивости проростков к неблагоприятным условиям внешней среды [25].

Нами проведено изучение начального роста проростков, полученных из семян, сформированных при оптимальной концентрации цинка (вариант Zn 20) и при его избытке (вариант Zn 160). Результаты наших экспериментов при проращивании семян на воде показали, что проростки варианта Zn 160 имели меньшие по сравнению с проростками варианта Zn 20 длину корня и побега (на 27 и 20% соответственно), а также сырую и сухую биомассу (на 35 и 30% соответственно) (табл. 2). Помимо этого, у них оказалась и меньшая (почти на 30%) по площади листовая пластинка 1-го листа. Поскольку на начальных этапах роста и развития злаков, когда проросток переходит к автотрофному питанию, формирование нормальной листовой пластинки 1-го листа чрезвычайно важно, т.к. именно первый лист является основным донором ассимилятов, уменьшение его размеров в дальнейшем может отрицательно сказаться на формировании последующих листьев и в целом на габитусе растения.

Исследование прорастания семян и роста проростков в неблагоприятных условиях среды, а именно при высокой (провокационной) концентрации цинка, выявило, что при 20 мМ металла энергия прорастания и всхожесть семян, сформированных в оптимальных условиях минерального питания, были больше (97 и 99% соответственно), чем семян, которые сформировались в условиях избытка цинка (79 и 85% соответственно). При этом отметим, что всхожесть семян в условиях действия высокой концентрации цинка оказалась практически такой же, как и при их проращивании на воде. Полученные результаты подтвердили мнение ряда авторов о том, что процесс прорастания семян является довольно устойчивым к действию высоких концентраций ТМ, в том числе цинка, что связано с неспособностью их ионов проникать через семенную оболочку. Лишь на заключительной стадии набухания, когда нарушается целостность семенных покровов, ионы металлов могут воздействовать на рост будущего проростка [26–28].

Таблица 2. Показатели роста проростков ячменя сорта Нур, полученных из семян, сформированных при оптимальной (20 мг/кг субстрата) и высокой (160 мг/кг субстрата) концентрациях цинка

Показатель	Варианты	
	Zn 20	Zn 160
Длина корня, см	10.8 ± 0.5	7.91 ± 0.57*
Длина побега, см	12.2 ± 0.3	9.87 ± 0.36*
Сырая биомасса проростка, мг	0.282 ± 0.009	0.196 ± 0.006*
Сухая биомасса проростка, мг	0.027 ± 0.001	0.013 ± 0.001*
Площадь 1-го листа, см ²	4.21 ± 0.10	2.97 ± 0.13*

Таблица 3. Влияние цинка в концентрации 20 мМ на показатели роста проростков ячменя сорта Нур, полученных из семян, сформированных при разных концентрациях цинка

Показатель	Варианты	
	Zn 20	Zn 160
Длина корня, см	0.71 ± 0.06	0.47 ± 0.01*
Длина побега, см	4.85 ± 0.15	4.06 ± 0.24*
Сырая биомасса проростка, мг	0.072 ± 0.003	0.053 ± 0.004*
Сухая биомасса проростка, мг	0.012 ± 0.0004	0.009 ± 0.001*

В литературе крайне мало сведений относительно сохранения устойчивости растений к ТМ в последующих поколениях. В нашем опыте цинк в концентрации 20 мМ оказал ярко выраженный негативный эффект на рост проростков ячменя, причем независимо от условий формирования семян. В частности, у проростков обоих вариантов опыта (Zn 20 и Zn 160) полностью останавливался рост корня, замедлялись рост побега и накопление биомассы растениями (табл. 3). Однако более сильное негативное воздействие изученная концентрация цинка оказала на проростки варианта Zn 160 по сравнению с вариантом Zn 20, что свидетельствовало о меньшей их металлоустойчивости.

Торможение роста корня растений в присутствии высоких концентраций цинка было обнаружено и другими авторами [27, 29, 30]. Это связано с тем, что у большинства видов растений, в том числе у ячменя, именно в корне задерживается основное количество поступившего в растение металла. В том случае, когда действующие в кор-

не механизмы детоксикации уже не справляются с потоком ионов, цинк поступает в надземные органы, оказывая ингибирующее действие и на рост побега [27]. При этом, как правило, у более металлоустойчивых растений отрицательное воздействие металла на ростовые показатели выражено в меньшей степени, чем у менее устойчивых.

Таким образом, показано, что выращивание растений ячменя на субстрате с высокой (160 мг/кг субстрата) концентрацией цинка не приводило к уменьшению количества формирующихся семян, но при этом снижалось их качество. Во многом это могло быть связано с различными нарушениями физиологических процессов материнских растений, выращенных в стрессовых условиях. В частности, известно, что избыток цинка вызывает в растениях уменьшение содержания фотосинтетических пигментов, замедление скорости фотосинтеза, снижение оводненности тканей, нарушение поступления макро- и микроэлементов [6, 8, 10]. Указанные нарушения приводят к уменьшению количества необходимых для формирования полноценного зародыша органических и неорганических веществ. Кроме того, на формирование семян в условиях высоких концентраций цинка может негативно отразиться изменение гормонального баланса материнских растений, а также нарушение гормонального сигналинга [2, 3], однако такие данные единичны.

Помимо этого, нельзя не учитывать и непосредственное воздействие избытка цинка на формирование семян. Поскольку этот металл способен накапливаться в довольно больших количествах в репродуктивных органах и созревающих семенах [31], можно предположить возможность его прямого действия на развивающийся зародыш семени. Это подтверждают и данные цитогенетических исследований, показавшие, что в период от образования гамет до созревания семян высокие концентрации цинка оказывали мутагенное действие, вызывая у семенного потомства ячменя снижение митотической активности меристематических клеток зародыша [32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выращивание растений ячменя на субстрате с избытком (160 мг/кг субстрата) цинка приводило к значительному снижению качества сформированных семян. Об этом свидетельствовала меньшая (по сравнению с семенами, сформированными в оптимальных условиях минерального питания) масса 1000 семян, более низкая энергия прорастания и всхожесть, слабый начальный рост проростков. Более того, потом-

ство таких растений оказалось менее устойчивым к высокой (20 мМ) концентрации цинка в среде роста. Основными причинами снижения в этих условиях качества семян были, вероятно, нарушения физиологических процессов в материнских растениях, влиявших на накопление необходимого для формирования полноценного зародыша количества питательных веществ и/или прямое воздействие ионов цинка на зародыш.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физиология и биохимия покоя и прорастания семян. Пер. с англ. Н.А. Аскоческой, Н.А. Гумилевской, Е.П. Заверткиной, Э.Е. Хавкина / Под ред. М.Г. Николаевой, Н.В. Обручевой. М.: Колос, 1982. С. 254–272.
2. Fenner M. The effects of the parent environment on seed germ inability // *Seed Sci. Res.* 1991. V. 1. I. 2. P. 75–84.
3. Penfield S., MacGregor D.R. Effects of environmental variation during seed production on seed dormancy and germination // *J. Exp. Bot.* 2017. V. 68. № 4. P. 819–825.
4. Van der Walt K., Witkowski E.T.F. Seed viability, germination and seedling emergence of the critically endangered stem succulent, *Adenium swazicum*, in South Africa // *South Afric. J. Bot.* 2017. V. 109. P. 237–245.
5. Казнина Н.М., Тумов А.Ф. Влияние дефицита цинка на физиологические процессы и продуктивность злаков // *Усп. совр. биол.* 2019. Т. 139. № 3. С. 280–291.
6. Bonnet M., Camares O., Veisseire P. Effects of zinc and influence of *Acremonium lolii* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activities of ryegrass (*Lolium perenne* L. cv. Apollo) // *J. Exp. Bot.* 2000. V. 51. № 346. P. 945–953.
7. Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P., Zelko I., Lux A. Zinc in plants // *New Phytol.* 2007. V. 173. P. 677–702.
8. Казнина Н.М., Тумов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние цинка на продуктивность ярового ячменя в вегетационном опыте // *Агрохимия.* 2010. № 8. С. 72–76.
9. Серегин И.В., Кожевникова А.Д., Грачева В.В., Быстрова Е.И., Иванов В.Б. Распределение цинка по тканям корня проростков кукурузы и его действие на рост // *Физиология растений.* 2011. Т. 58. № 1. С. 85–94.
10. Ильин В.Б., Гармаш Г.А., Гармаш Н.Ю. Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур // *Агрохимия.* 1985. № 6. С. 90–100.
11. Vassilev A., Kerin V., Atanassov P. Effect of cadmium pollution of soil upon productivity and seedling qualities of two winter barley (*H. vulgare* L.) cultivars // *Bulg. J. Agric. Sci.* 1996. V. 2. P. 333–340.
12. Батова Ю.В., Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М., Тумов А.Ф. Влияние загрязнения кадмием на рост и семенную продуктивность однолетних злаков // *Агрохимия.* 2012. № 6. С. 79–83.

13. Аникиев В.В., Кутузов Ф.Ф. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков // Физиология растений. 1961. Т. 8. № 3. С. 375–377.
14. Иванов В.М., Филлин В.И. Исследование приемов возделывания озимых и яровых зерновых культур в Нижнем Поволжье. Волгоград: ВолгоградГСХА, 2004. 296 с.
15. Скворцова Ю.Г., Филенко Г.А., Фирсова Т.И., Анисимова Н.Н., Газе В.Л. Влияние водного стресса на посевные качества семян озимой пшеницы // Зерн. хоз-во России. 2017 № 6. С. 52–55.
16. Иванов М.В. Формирование хозяйственно-биологических признаков ярового ячменя в процессе селекции с использованием приемов биотехнологии: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 1998. 72 с.
17. Донцова А.А., Филиппов Е.Г. Наследование массы 1000 семян у гибридов F1 озимого ячменя в диалельных скрещиваниях // КубГАУ. 2010. № 63. С. 271–280.
18. Сумина А.В. Влияние факторов среды на массу 1000 зерен сортов ячменя, выращенные в котловинных условиях Сибири // Juvenis scientia. Сел.-хоз. науки. 2017. № 10. С. 4–6.
19. Шишлова Н.П. Влияние абиотических факторов на физико-химические характеристики семян озимого тритикале // Физиол. и биохим. культ. раст. 2013. Т. 45. № 3. С. 267–274.
20. Николаева М.Г., Лянгузова И.В., Поздова Л.М. Биология семян. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1999. 232 с.
21. Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal C.E., Colville L. 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 Environ. 2015. V. 38. P. 1011–1022.
22. Zinsmeister J., Leprince O., Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity // Biochem. J. 2020. V. 477. P. 305–323.
23. Sacandé M., Hoekstra F.A., van Aelst A.C., De Vos C.H.R. Is oxidative stress involved in the loss of neem (*Azadirachta indica*) seed viability? // Seed Sci. Res. 2000. V. 10. I. 3. P. 381–392.
24. Salem M.A., Li Y., Wiszniewski A., Giavalisco P. Regulatory-associated protein of TOR (RAPTOR) alters the hormonal and metabolic composition of *Arabidopsis* seeds, controlling seed morphology, viability and germination potential // Plant J. 2017. V. 92. P. 525–545.
25. Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Минск: Право и экономика, 2005. 48 с.
26. Лянгузова И.В. Влияние никеля и меди на прорастание семян и формирование проростков черники // Физиология растений. 1999. Т. 46. № 3. С. 500–502.
27. Холодова В.П., Волков К.С., Кузнецов В.В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации // Физиология растений. 2005. Т. 52. № 6. С. 848–858.
28. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: КарелНЦ РАН, 2007. 170 с.
29. Rengel Z. Ecotypes of *Holcus lanatus* tolerant to zinc toxicity also tolerate zinc deficiency // Ann. Bot. 2000. V. 86. P. 1119–1126.
30. Jain R., Srivastava S., Solomon S., Shrivastava A.K., Chandra A. Impact of excess zinc on the growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and antioxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.) // Acta Physiol Plant. 2010. V. 32. P. 979–986.
31. Минкина Т.М., Манджиева С.С., Богданова А.М., Чаплыгин В.А., Бауэр Т.В., Бурачевская М.В., Маштыкова Л.Ю., Громакова Н.В., Сушкова С.Н. Поступление цинка и свинца в ячмень из загрязненной почвы // Научн. электр. период. изд-е ЮФУ “Живые и биокосные системы”. 2016. № 17. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-17/article-3>
32. Васильев Д.В. Влияние загрязнения почв цинком на качество семенного потомства ячменя сорта Зазерский 85 // Инновационные подходы в решении проблем современного общества / Под ред. Гуляева Г.Ю. Пенза, 2018. С. 204–218.

Effect of Zinc Excess on Seed Quality of Barley

N. M. Kaznina^{a, #}, A. K. Zadornaya^b, and Yu. V. Batova^a

^a Institute of Biology of Karelian Research Center, RAS,
ul. Pushkinskaya 11, Petrozavodsk 185910, Karelia, Russia

^b Petrozavodsk State University, ul. Lenina 33, Petrozavodsk 185910, Karelia, Russia

[#]E-mail: kaznina@krc.karelia.ru

The influence of zinc in the optimal (20 mg/kg of substrate) and high (160 mg/kg of substrate) concentrations on the quality of Nur barley seeds formed under these conditions was studied. It was found that the excess of zinc in the substrate led to a deterioration in the quality of seeds, as evidenced by the lower (compared to seeds formed under optimal conditions of mineral nutrition) weight of 1000 seeds, lower germination energy and germination, weak initial growth of seedlings, as well as their lower resistance to high (20 mM) metal concentration. It is assumed that the reasons for the decline in seed quality under these conditions are violations in the mother plants of physiological processes that affect the formation of the grain and the accumulation of necessary nutrients in the seed, and/or the direct effect of zinc ions on the seed embryo.

Key words: *Hordeum vulgare* L., excess zinc, seed quality, seed viability, seed growth power.