

УДК 631.559:632.16“321”:546.47:581.1

ВЛИЯНИЕ ЦИНКА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В ВЕГЕТАЦИОННОМ ОПЫТЕ

© 2010 г. Н.М. Казнина, А.Ф. Титов, Г.Ф. Лайдинен, Ю.В. Батова

*Институт биологии Карельского научного центра РАН
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия
E-mail: kaznina@krc.karelia.ru*

Поступила в редакцию 16.09.2009 г.

Изучено влияние повышенного содержания цинка (40, 80, 160 и 320 мг/кг субстрата) на продуктивность ярового ячменя и физиологические показатели растений, влияющие на ее формирование. Показано, что в присутствии цинка происходило замедление роста растений: уменьшались размеры корня и побега, снижалось накопление подземной и надземной биомассы и изменялось их соотношение. С увеличением концентрации цинка в субстрате заметно уменьшалась площадь листовой пластинки и снижалась интенсивность фотосинтеза, что могло быть причиной уменьшения накопления зеленой массы ячменя. В фазе созревания зерна у растений наблюдали подавление побегообразования, было отмечено уменьшение площади флагового листа. Уменьшение семенной продуктивности ячменя в присутствии цинка было связано с меньшей озерненностью колоса.

Ключевые слова: загрязнение почвы, цинк, яровой ячмень, продуктивность.

ВВЕДЕНИЕ

Среди зерновых злаков яровой ячмень занимает в России одно из первых мест по посевным площадям [1], он является важнейшей фуражной и зерновой культурой, способной формировать высокие урожаи зеленой массы и семян в разных климатических зонах [2]. По сравнению с другими зерновыми ячмень очень требователен к плодородию почвы и ее физико-химическим свойствам, при его выращивании в неблагоприятных почвенных условиях возможны значительные потери урожая зеленой массы и зерна [3–5].

В последние годы во всем мире серьезной экологической проблемой становится накопление тяжелых металлов в почвах, занятых под сельскохозяйственные культуры. Цинк является одним из самых распространенных загрязнителей, поскольку поступает в почву не только с выбросами промышленных предприятий, но и с фосфорными удобрениями, а также с химическими средствами защиты от болезней и вредителей, которые находят все более широкое применение [6–8]. В результате в отдельных регионах страны содержание этого металла в почве может в десятки и даже сотни раз превышать ПДК [9, 10]. В малых дозах цинк необходим для нормального роста и развития растений, увеличение его содержания в почве до величин, превосходящих ПДК, приводит к замедлению основных физиологических процессов [11–14], что неизбежно

но отрицательно сказывается на продуктивности растений. Пока количество исследований о действии высоких концентраций этого металла в почве на урожай зеленой массы и семян (плодов) культурных видов невелико.

Цель работы – изучение влияния повышенного содержания цинка в субстрате на продуктивность растений ячменя и некоторые физиологические показатели, влияющие на ее формирование.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования был яровой ячмень сорта Зазерский 85. Растения выращивали в условиях вегетационного опыта в песчаной культуре. Сернокислый цинк в концентрациях 40, 80, 160 и 320 г Zn/кг субстрата вносили однократно при закладке опыта. Полевую всхожесть семян определяли по появлению всходов на 7-е сут после посева.

В фазе 2-х листьев влияние цинка оценивали по изменению относительно контроля длины и массы корня, высоты и массы побега, площади 1-го листа, а также ряда показателей фотосинтетической активности и водного обмена. Площадь листовой пластинки рассчитывали по формуле $S = 2/3ld$, где l – длина листа, d – ширина листа [15].

Содержание пигментов определяли спектрофотометрическим методом в 80%-ном ацетоновом

экстракте. Для расчета концентрации пигментов использовали формулы Вернона [16]. Интенсивность нетто-фотосинтеза и транспирации оценивали с помощью установки для исследования концентрации CO_2 и водяных паров (НСМ-1000, Walz, Германия). Содержание воды в тканях определяли весовым методом, высушивая листья в термостате при 105°C до постоянного веса [17].

В фазе созревания зерна о влиянии цинка на продуктивность растений судили по изменению в сравнении с контролем следующих показателей: высоты главного побега, количества боковых побегов, накопления надземной биомассы, длины и биомассы колоса, количества сформировавшихся в колосе колосков и зерновок.

Повторность опыта трехкратная, для анализа выбирали по 10 растений из каждой повторности. Опыт проводили в течение 2 вегетационных сезонов. Результаты обработаны с помощью методов вариационной статистики. О достоверности различий судили по t -критерию Стьюдента при $P < 0.05$ [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цинк в изученных концентрациях не влиял негативно на прорастание семян ячменя, на 7-е сут во всех вариантах опыта отмечена их 100%-ная всхожесть.

Поскольку у злаков формирование урожая в значительной мере зависит от нормального роста и развития растений на ранних этапах органогенеза (II–III этапы), когда происходит формирование всех основных элементов продуктивности [19], было изучено влияние цинка на ряд физиологических показателей растений, находящихся в фазе 2-х листьев. Было установлено, что при содержании 40 мг Zn/кг субстрата элемент не оказывал выраженного отрицательного действия на изученные показатели, при более высоких его концентрациях происходили

нарушения физиологических процессов, что вызвало замедление роста растений ячменя (табл. 1). В большей степени происходило замедление роста корневой системы растений (уменьшались длина корней и их биомасса), хотя количество боковых корней даже несколько увеличивалось, очевидно, частично компенсируя потерю площади поверхности, способной поглощать воду и минеральные вещества. Рост побега замедлялся в меньшей степени, что, по-видимому, связано с ограничением поступления цинка в надземные органы благодаря активной барьерной роли корня [20].

Присутствие в почве цинка в повышенных концентрациях приводило к заметному уменьшению по сравнению с контролем отношения биомассы корня растения к биомассе его побега, вызванному более сильным угнетением роста корня. Это негативно отразилось на ряде физиологических процессов в растениях, в частности, на минеральном питании и водном обмене, и приводило к уменьшению урожая зеленой массы и зерна [21].

Изучение фотосинтеза, как ключевого звена в процессе формирования продуктивности растений, показало, что в высоких концентрациях цинк подавлял этот процесс. Под влиянием металла в дозе 80 мг/кг субстрата скорость нетто-фотосинтеза в листьях заметно уменьшалась по сравнению с контрольным вариантом, а увеличение его концентрации до 320 мг/кг субстрата приводило к уменьшению этого показателя почти на 70% (табл. 2). В несколько меньшей степени уменьшалась площадь листовой пластинки. Наиболее устойчивой к загрязнению почвы цинком среди изученных параметров оказалась величина содержания в листьях хлорофилла *a* и *b*. Уменьшение его содержания наблюдали только при максимальной концентрации металла (320 мг Zn/кг субстрата). Поскольку у растений ячменя вклад листьев в фотосинтетическую деятельность очень велик [1], а их суммарная поверхность тесно коррелирует с продуктивностью [22, 23], то логич-

Таблица 1. Влияние содержания цинка в субстрате на показатели роста растений ячменя в фазе 2-х листьев, % от контроля

Вариант, мг Zn/кг субстрата	Корень		Количество боковых корней	Побег		Биомасса корня/ биомасса побега
	длина	биомасса		высота	биомасса	
1. 40	105	89	100	97	97	92
2. 80	85*	86*	104	90*	87*	87*
3. 160	39*	44*	109*	81*	75*	84*
4. 320	12*	22*	121*	71*	69*	65*

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 2–5.

* Различия по отношению к контролю достоверны при $P < 0.05$. То же в табл. 2–5.

но предположить, что обнаруженное негативное влияние цинка на формирование площади поверхности листьев и интенсивность фотосинтеза могло быть одной из главных причин уменьшения продуктивности ячменя при повышенном содержании металла в субстрате.

Важную роль в формировании продуктивности растений играет также и водный режим, нарушения параметров которого могут приводить к значительным потерям урожая зеленой массы и зерна [2]. Использованные концентрации цинка не оказывали явно выраженного отрицательного влияния на содержание воды в тканях растений ячменя: ее содержание в тканях корня достоверно уменьшалось по сравнению с контролем лишь в присутствии металла в концентрации 320 мг/кг субстрата, в тканях листа – не изменялась (табл. 3). Вместе с тем при концентрации цинка 80 мг/кг субстрата заметно уменьшалась интенсивность транспирации растений ячменя. Возможно, обнаруженный эффект является адаптивной реакцией растений, направленной на сохранение необходимого уровня оводненности клеток при уменьшении размеров корневой системы и ее поглотительной способности [24].

Влияние повышенных концентраций цинка на уменьшение показателей роста и фотосинтетическую активность листьев, обнаруженное на ранних стадиях развития ячменя, в дальнейшем отразилось на накоплении зеленой массы и семенной продуктивности. В частности, в фазе созревания семян под влиянием этого металла заметно уменьшалась надземная биомасса растений (табл. 4). Уменьшение продуктивности в большей степени было связано с уменьшением общего числа боковых и генеративных побегов. Высота главного побега с увеличением содержания цинка до 160 мг/кг субстрата даже несколько увеличивалась. Поскольку между главным и боковыми побегами существует конкуренция за ассимиляты, то, блокируя процесс побегообразования, растение обеспечивает условия для формирования полноценных семян центрального колоса [3]. Увеличение концентрации металла до 320 мг/кг субстрата вызывало задержку развития растений ячменя, поэтому на момент отбора проб растения в этом варианте находились в фазе начала колошения.

В вариантах с дозами цинка 40, 80 и 160 мг/кг субстрата у растений ячменя значительно уменьшалась площадь флагового листа, в варианте с дозой цинка 320 мг/кг субстрата – он не формировался вообще (табл. 4). Флаговый лист у злаков является основным поставщиком ассимилятов в колос и участвует в формировании и наливе зерна [1], поэтому уменьшение его площади, оче-

Таблица 2. Влияние цинка на фотосинтетическую активность растений ячменя

Вариант	Площадь 1-го листа, см ²	Хлорофиллы (a + b) мг/г сырой массы	Интенсивность фотосинтеза, мкм/м ² · с
Без загрязнения (контроль)	3.10 ± 0.17	1.29 ± 0.05	13.5 ± 0.2
1	2.87±0.23	1.25±0.06	13.6±0.71
2	2.48±0.16*	1.24±0.04	11.3±0.6*
3	2.06±0.10*	1.22±0.02	6.04±0.96*
4	1.49±0.10*	1.12±0.03*	4.28±0.59*

Таблица 3. Влияние цинка на показатели водного режима растений ячменя

Вариант	H ₂ O в тканях, %		Интенсивность транспирации, мМ/м ² ·с
	корень	побег	
Без загрязнения (контроль)	90.3±0.5	85.4±0.5	4.44±0.13
1	92.2±0.2	86.1±0.8	4.33±0.03
2	91.6±0.5	85.9±0.7	3.46±0.09*
3	88.4±1.2	86.5±1.2	3.50±0.31*
4	81.4±1.2*	85.9±1.0	2.50±0.20*

видно, могло отрицательно сказаться на зерновой продуктивности. Кроме того, повышенное содержание цинка вызывало ускорение старения и отмирания нижних листьев, сокращая тем самым общую ассимиляционную поверхность и, соответственно, общую фотосинтетическую продуктивность растений.

Влияние цинка на отдельные элементы зерновой продуктивности ячменя оказалось неоднозначным. Например, такие показатели как длина колоса и количество сформированных колосков у растений опытных вариантов практически не отличались от контроля, тогда как масса колоса и количество зерен в нем значительно уменьшались с увеличением концентрации металла в субстрате (табл. 5). Известно, что сохранение нормальных размеров колоса и образование большого колосков в условиях стресса позволяют растению обеспечить высокий потенциал семенного возобновления, хотя неблагоприятные условия среды уменьшают возможность его реализации и приводят к недоразвитию части зерен [3, 25]. Полученные данные свидетельствуют

Таблица 4. Влияние цинка на показатели роста и развития растений ячменя в фазе созревания зерна, % от контроля

Вариант	Высота главного побега	Площадь флагового листа	Надземная биомасса растения	Общее количество побегов	
				боковых	генеративных
1	106	70*	98	83	93
2	116*	67*	96	81*	90
3	124*	60*	81*	44*	48*
4	83*	–	63*	40*	47*

Примечание. Прочерк – лист не сформировался.

Таблица 5. Влияние цинка на формирование элементов семенной продуктивности ячменя

Вариант	Длина колоса, см	Биомасса колоса, г	Количество в колосе, шт.	
			колосков	зерен
Без загрязнения (контроль)	3.93±0.17	0.68±0.01	12.0±0.42	8.7±0.69
1	3.96±0.14	0.58±0.06*	13.0±0.39	8.4±0.65
2	4.41±0.13	0.53±0.06*	11.6±0.43	7.1±0.91*
3	4.18±0.13	0.52±0.04*	12.2±0.51	6.8±0.61*

о том, что уменьшение зерновой продуктивности растений ячменя в условиях повышенного содержания цинка в субстрате было связано, прежде всего, с уменьшением озерненности колоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что при содержании цинка от 40 до 320 мг/кг субстрата он не оказывал негативного влияния на всхожесть семян ячменя. На ранних этапах онтогенеза в фазе 2-х листьев металл в концентрациях 80–320 мг/кг субстрата ингибировал рост растений, при этом в большей степени замедлялся рост корня, в меньшей степени – рост побега. Под влиянием загрязнения цинком уменьшались площадь листовой пластинки и интенсивность фотосинтеза, что могло быть одной из главных причин уменьшения продуктивности ячменя, хотя содержание хлорофилла в листьях оставалось без изменений. Влияние цинка на водный режим растений было связано с уменьшением транспирации, что позволяло им сохранить значительное количество воды в тканях корня и листьев. На поздних этапах онтогенеза в фазе созревания зерна увеличение концентрации цинка в субстрате приводило к уменьшению площади флагового листа и к уменьшению продуктивности надземной биомассы растений, главным образом, за счет подавления побегообразования. Снижение зерновой продуктивности ячменя под влиянием цинка было связано главным образом с уменьшением количества зерновок в колосе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головки Т.К., Родина Н.А., Куренкова С.В., Табаленкова Г.Н. Ячмень на севере. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 156 с.
2. Шевелуха В.С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе. М.: Колос, 1992. 593 с.
3. Удовенко Г.В., Гончарова Э.А. Влияние экстремальных условий среды на структуру урожая сельскохозяйственных растений. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 144 с.
4. Медведев П.Ф., Сметанникова А.И. Кормовые растения европейской части СССР (Справочник). Л.: Колос, 1981. 335 с.
5. Sinebo W. Yield relationships of barleys grown in a tropical highland environment // Crop. Sci. 2002. V. 42. P. 428–437.
6. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, СО, 1991. 149 с.
7. Добровольский В.В. Основные черты биохимии цинка и кадмия // Цинк и кадмий в окружающей среде. М.: Наука, 1992. С. 7–18.
8. Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P. et al. Zinc in plants // N. Phytol. 2007. V. 173. P. 677–702.
9. Dobrovolsky V.V. Biogeochemistry of the World's land. M.: Mir Publishers, Boca Raton–Ann Arbor–Tokyo–London: CRC Press, 1994. 362 p.
10. Царева М.В., Персикова Т.Ф. Тенденции антропогенного влияния на деградацию и изменение экологического состояния почв // Нейтрализация загрязненных почв / Под ред. Мажайского Ю.А. Рязань: Мещерский филиал ВНИИГиМ РАСХН, 2008. С. 29–80.

11. Ильин В.Б., Гармаиш Г.А., Гармаиш Н.Ю. Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 1985. № 6. С. 90–100.
12. 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.
13. Zhao F.J., Lombi E., McGrath S.P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* // *Plant Soil*. 2003. V. 249. P. 37–43.
14. Алехина Н.Д., Харитонашвили Е.В. Минеральное питание. Физиология растений. М.: Academia, 2005. С. 306–415.
15. Аникиев В.В., Кутузов Ф.Ф. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков // *Физиология растений*. 1961. Т. 8. № 3. С. 375–377.
16. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // *Биологические методы в физиологии растений*. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
17. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
18. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1979. 350 с.
19. Куперман Ф.М. Морфофизиология растений. М.: Высш. шк., 1968. 223 с.
20. Clemens S., Palmgren M.G., Krämer U. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation // *Trends Plant Sci.* 2002. V. 7. № 7. P. 309–315.
21. Кудоярова Г.Р., Веселов С.Ю., Усманов И.Ю. Гормональная регуляция соотношения биомассы побег/корень при стрессе // *Журн. общ. биологии*. 1999. Т. 60. № 6. С. 633–641.
22. Ничипорович А.А. Фотосинтетическая деятельность растений и пути повышения их продуктивности // *Теоретические основы фотосинтетической продуктивности*. М.: Наука, 1972. 275 с.
23. Dofing S.M. Ontogenetic evaluation of grain yield and time to mature in barley // *Agron. J.* 1997. V. 89. P. 685–690.
24. Salt D.E., Prince R.C., Pickering I.J., Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard // *Plant Physiol.* 1995. V. 109. P. 1424–1433.
25. Ma B.L., Smith D.L. Apical development of spring barley under field conditions in northeastern North America // *Crop Sci.* 1992. V. 32. № 1. P. 144–149.

Effect of Zinc on the Yield of Spring Barley in a Pot Experiment

N.M. Kaznina, A.F. Titov, G.F. Laidinen, J.V. Batova

*Institute of Biology Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences,
ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk 185910, Karelia, Russia
E-mail: kaznina@krc.karelia.ru*

The effect of high zinc concentrations (40, 80, 160 and 320 mg/kg of substrate) on the productivity of spring barley and some physiological parameters of its plants affecting its formation was studied. It was shown that zinc inhibited the growth of plants: the length of roots and shoots decreased; the biomass of under- and overground organs was reduced, and their ratio changed. The increase of zinc concentration in the substrate resulted in a decrease of leaf area and photosynthesis intensity and, hence, a reduction of barley vegetative mass. At the stage of seed maturation, zinc suppressed the tillering and decreased the flag-leaf area. The reduction of seed yield in the presence of zinc was related to the decrease in grain number per spike.

Key words: soil contamination, zinc, spring barley, productivity.