

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.369-378>

УДК 633.16 : 581.1



## Эффекты избытка марганца(II) на рост и антиоксидантный статус проростков ячменя

© 2020. О. А. Симонова<sup>1</sup> ✉, М. В. Симонов<sup>2</sup>, Е. В. Товстик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация

Марганец относится к группе тяжелых металлов, которые в высоких концентрациях могут оказывать негативное влияние на развитие растений. Типичными почвами Кировской области являются кислые подзолистые и дерново-подзолистые почвы, для которых характерно высокое содержание доступных для растений соединений марганца. Исследовали влияние ионов марганца(II) в концентрациях 30,0; 60,0 и 90,0 мг/л на рост и антиоксидантную активность (АОА) фермента супероксиддисмутазы (СОД) в органах 7- и 14-суточных растений ячменя, выращиваемых в водной культуре. Объектами исследования служили устойчивые к кислым почвам ( $Al^{3+}$ ,  $H^+$ ) сорта и формы ячменя 346-09, 29-11, Фермер 198-12, Форвард и Бионик, в качестве стандарта использовали сорт Белгородский 100. При добавлении марганца в среду выращивания растений отмечали уменьшение длины корней и увеличение в них АОА СОД. Заключили, что повышенные концентрации марганца оказывают влияние на морфометрические параметры и АОА СОД проростков ячменя. Установлено, что увеличение дозы марганца в среде выращивания растений приводит к уменьшению длины корней. АОА СОД отличалась в разных органах растений некоторых сортов, а ее более значительное изменение в опыте по сравнению с контролем было выявлено в корнях. Судя по морфометрическим показателям, наименее устойчивым к ионной токсичности  $Mn^{2+}$  оказался сорт Белгородский 100, длина корня которого в контроле составила  $15,7 \pm 0,4$ , а в опыте  $13,2 \pm 0,3$ ;  $12,2 \pm 0,1$ ;  $11,5 \pm 0,3$  см в соответствии с дозой марганца 30, 60 и 90 мг/л. По уровню АОА СОД наиболее чувствительным оказался сорт Фермер 198-12, у которого изменение АОА СОД в корнях (% от контроля) составило 158,8; 167,2 и 169,4 % в соответствии с дозой марганца 30,0; 60,0 и 90,0 мг/л (АОА СОД в контроле составила  $52,4 \pm 0,4$  %; в опыте  $83,1 \pm 2,2$ ;  $87,6 \pm 2,0$  и  $88,7 \pm 0,6$  соответственно), в побегах – 121,0; 128,3 и 125,6 % соответственно ( $66,7 \pm 7,9$  % в контроле и  $80,7 \pm 0,5$ ;  $85,6 \pm 1,4$ ;  $83,8 \pm 0,6$  % в опыте в соответствии с дозой  $Mn^{2+}$ ).

**Ключевые слова:** сорт, стресс, длина корня, побеги, листья, супероксиддисмутаза, относительное массовое соотношение корней и побегов.

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № 0528-2019-0093).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Симонова О. А., Симонов М. В., Товстик Е. В. Эффекты избытка марганца(II) на рост и антиоксидантный статус проростков ячменя. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(4):369-378. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.369-378>

Поступила: 25.03.2020

Принята к публикации: 23.07.2020

Опубликована онлайн: 24.08.2020

## The effect of manganese(II) excess on growth and antioxidant status of barley seedlings

© 2020. Olga A. Simonova<sup>1</sup> ✉, Maksim V. Simonov<sup>2</sup>, Evgeniya V. Tovstik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation,

<sup>2</sup>Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

Manganese belongs to the group of heavy metals, which at high concentrations can have a negative effect on plant development. Typical soils of the Kirov region are acid podzolic and sod-podzolic soils, which are characterized by high content of manganese compounds available for plants. Studied was the effect of manganese(II) ions at the concentrations of 30.0, 60.0 and 90.0 mg/l on the growth and antioxidant activity (AOA) of the superoxide dismutase enzyme (SOD) in the organs of 7 and 14-day-old barley plants grown in aquatic culture. Varieties and forms of barley 346-09, 29-11, Farmer 198-12, Forward and Bionik, resistant to acidic soils ( $Al^{3+}$ ,  $H^+$ ) served as objects for the research; Belgorodskij 100 variety was used as standard. When manganese was added to the solution for growing, a decrease in root length and an increase in AOA of SOD in plant roots were noted. It was concluded that increased concentrations of manganese had an effect on the morphometric

parameters and on AOA SOD of barley seedlings. It has been established that increasing the dose of manganese in the solution for growing leads to a decrease in the length of the roots. AOA SOD varied in different organs of plants of some varieties, and its more significant change in the experiment compared with the control was revealed in the roots. Judging by morphometric indicators, the Belgorodskij 100 variety was the least resistant to  $Mn^{2+}$  ionic toxicity, the root length of which in the control was  $15.7 \pm 0.4$  cm, and in the experiment  $13.2 \pm 0.3$ ;  $12.2 \pm 0.1$ ;  $11.5 \pm 0.3$  cm in accordance with the dose of manganese 30, 60 and 90 mg / l. According to the level of AOA SOD, the most sensitive variety was Farmer 198-12, its change of AOA SOD in the roots (% of control) was 158.8; 167.2 and 169.4% in accordance with the dose of manganese 30.0; 60.0 and 90.0 mg / l (AOA SOD in the control was  $52.4 \pm 0.4\%$ ; in the experiment  $83.2 \pm 2.2$ ;  $87.6 \pm 2.0$  and  $88.7 \pm 0.6$ , respectively), and in the shoots – 121.0; 128.3 and 125.6 %, respectively ( $66.7 \pm 7.9$  % in the control and  $80.7 \pm 0.5$ ;  $85.6 \pm 1.4$ ;  $83.8 \pm 0.6$  % in the experiment in accordance with the dose of  $Mn^{2+}$ ).

**Keywords:** variety, stress, root length, shoots, leaves, superoxide dismutase, relative weight ratio of roots and shoots

**Acknowledgement:** 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 Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky (topic No. 0528-2019-0093).

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

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Simonova O. A., Simonov M. V., Tovstik E. V. The effect of manganese(II) excess on growth and antioxidant status of barley seedlings. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(4): 369-378. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.369-378>

Received: 25.03.2020

Accepted for publication: 23.07.2020

Published online: 24.08.2020

Многие тяжелые металлы (ТМ) являются необходимыми элементами для полноценного развития растений, но в избыточных концентрациях они могут оказывать токсическое действие на их рост. К таким ТМ относится марганец [1]. Подзолистые и дерново-подзолистые почвы характеризуются высоким содержанием как валовых, так подвижных соединений марганца. Известно, что валовые запасы элементов в почве обусловлены составом материнской породы и особенностями почвообразовательного процесса. Например, в почвах Республики Мордовия их среднее количество составляет 1213 мг/кг, а в почвообразующих породах Кировской области – варьирует от 442 до 1226 мг/кг [2, 3]. Доступными для растений, имеющими наибольшее значение для их минерального питания, являются подвижные соединения элементов, содержание которых в почве связано с кислотностью. Токсическое действие избытка ионов марганца(II) на растения может проявляться на почвах с уровнем pH от 5,5 ед. и ниже [4]. Токсичность  $Mn^{2+}$  проявляется в нарушении физиолого-биохимических процессов и развитии окислительного стресса, что приводит к торможению роста и снижению продуктивности, а при сильном стрессе и к гибели растений [5].

Наиболее эффективным способом решения данной проблемы является создание устойчивых генотипов сельскохозяйственных культур. В условиях Кировской области наиболее распространенным эдафическим стрессом на дерново-подзолистых почвах является высокая кислотность. При этом избыточное

присутствие подвижного алюминия в кислой почве может усиливать данный эффект [6]. Поэтому значительная часть полученных в регионе сортов сельскохозяйственных культур адаптирована именно к этим почвенным факторам. Известно, что приобретение устойчивости растений к одному виду стресса не исключает устойчивости к другим факторам в силу возможной сопряженной устойчивости [7]. Однако в отдельных случаях прямой корреляции между чувствительностью растений к  $Al^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  и pH почвы не выявлено [8, 9].

**Цель работы** – изучение влияния повышенных концентраций марганца(II) на рост и антиоксидантный статус сортов ячменя, адаптированных к кислым почвам Кировской области.

**Материал и методы.** Объектами исследования служили растения ячменя сортов: 346-09; 29-11; Фермер 198-12; Форвард; Бионик из рабочей коллекции лаборатории селекции и первичного семеноводства ячменя ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. В качестве стандарта использовали сорт Белгородский 100, рекомендованный Госкомиссией по сортоиспытанию Кировской области.

Ячмень выращивали на дистиллированной воде в течение 7 суток или на питательном растворе Кнопа ( $Ca(NO_3)_2$  – 1;  $K_3PO_4$  – 0,25;  $MgSO_4 \times 7H_2O$  – 0,25;  $KCl$  – 0,125 г) в течение 14 суток. Семена закладывали в рулоны по 33 штуки в трехкратной повторности. Марганец вносили в виде соли  $MnSO_4 \times H_2O$  в концентрации 30, 60 и 90 мг/л действующего вещества (д. в.). Контрольные растения выращивали без добавления соли. Выбор концен-

траций был обусловлен тем, что предельно допустимые концентрации (ПДК) подвижных соединений марганца (извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8) для дерново-подзолистых почв с pH 4,0 в соответствии с ГН 2.1.7.2041-06 составляет 60 мг/кг. Вносимые дозы марганца соответствовали 0,5; 1,0 и 1,5 ПДК.

Устойчивость ячменя к марганцу оценивали по ряду показателей. Измеряли длину корней 7-дневных растений и рассчитывали соотношение длины корней растений в опыте и контроле (индекс длины корней, ИДК). Определяли массу сухих растений и относительное (в %) массовое соотношение корней и побегов (ОМС). Показатель ОМС использовали для дифференциации сортов по уровню устойчивости, так как он дает информацию о перераспределении пластических веществ между надземными и подземными органами [10]. Антиоксидантный статус определяли в корнях и надземной части 7-дневных, в листьях 14-дневных растений.

Активность антиоксидантной (АОА) системы оценивали по способности фермента супероксиддисмутазы (СОД) ингибировать аутоокисление адреналина и, тем самым, предотвращать образование активных форм кислорода<sup>1</sup> [11]. Навеску растительного образца (0,2-1,0 г сырой массы) растирали в 10 мл бикарбонатного буфера (pH = 10,30-10,65 ед.) и отфильтровывали. К 3 мл бикарбонатного буфера добавляли 0,1 мл 0,1 % раствора адреналина гидрохлорида и измеряли оптическую плотность при длине волны 347 нм через 2 ч (ОП<sub>1</sub>). Далее к 2 мл буфера добавляли 1 мл фильтрата, 0,1 мл 0,1 % раствора адреналина гидрохлорида и определяли оптическую плотность (ОП<sub>2</sub>). АОА рассчитывали по формуле:

$$АОА = \frac{(ОП_1 - ОП_2) \times 100 \%}{ОП_1}.$$

По значению величины АОА судили о наличии антиоксидантной активности (более 10 %). По изменению значений АОА СОД в вариантах опыта по сравнению с контролем исследуемые сорта ячменя подразделяли на 3 группы: индифферентные к стрессу (неизменный уровень); чувствительные по отрицательному типу (снижение уровня); чувстви-

тельные по положительному типу (повышение уровня АОА) [12].

Модельные опыты выполняли в 3-кратной повторности. Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программы MS Excel. Для числовых характеристик морфометрических и физиологических показателей рассчитывали средние арифметические значения и их стандартные ошибки. Существенность различий между вариантами определяли при уровне значимости  $P \geq 0,95$  (P-доверительная вероятность). ИДК, изменение ОМС и АОА СОД в вариантах опыта оценивали в процентах по отношению к контролю (среда для выращивания без добавления марганца).

**Результаты и их обсуждение.** Оценка морфометрических параметров роста растений по длине корней позволила установить токсический эффект всех исследованных доз марганца в варианте опыта с сортом Белгородский 100 (табл. 1). В этом случае отмечали закономерное уменьшение длины корней с увеличением концентрации ионов марганца(II) в среде для выращивания растений. У остальных исследуемых сортов ячменя минимальная в опыте концентрация ионов марганца(II) не оказала достоверного влияния на линейный рост корней. Исключение составил сорт Фермер 198-12, для которого отмечали стимулирующий эффект (ИДК составил 110,1 %) минимальной дозы марганца (30 мг/л) на линейный рост корней (табл. 1).

По уровню устойчивости к марганцу исследованные сорта ячменя, согласно классификации, предложенной S. Navacode с соавт., отнесены к группе устойчивых (ИДК более 65 %) [13]. При этом сорт Белгородский 100, на фоне других исследованных сортов, имел самые низкие значения ИДК (от 73,3 до 84,1 %). Показатель ОМС по отношению к контролю у сорта Белгородский 100 варьировал от 74,0 до 84,1 %. У остальных исследованных сортов данный показатель отличался от контроля в меньшей степени, чем у стандартного. Однако в случае наибольшей исследуемой в опыте концентрации марганца (90 мг/л) наблюдали снижение значений ОМС у всех исследованных сортов, за исключением сорта Форвард.

<sup>1</sup>Сирота Т. В., 1999. Способ определения антиоксидантной активности супероксиддисмутазы и химических соединений. Заявка № 99103192 (003673), приоритет от 24.02.1999

*Таблица 1 – Влияние марганца на длину корней и ОМС разных сортов ячменя /*  
*Table 1 – The effect of manganese on the length of roots and RWR of different varieties of barley*

<i>Copt / Variety</i>	<i>Mn<sup>2+</sup>, мг/л Mn<sup>2+</sup>, mg/L</i>	<i>Длина корня / Root length</i>		<i>ОМС, % / RWR, %</i>	
		<i>значения, см / values, cm</i>	<i>ИДК, %/ IRL, %</i>	<i>значения / values</i>	<i>изменение / change</i>
Белгородский 100 / Belgorodskij 100	0	15,7±0,4	-	107,7±0,7	-
	30	13,2±0,3	84,1	90,6±0,8	84,1
	60	12,2±0,1	77,7	88,5±1,4	82,2
	90	11,5±0,3	73,3	79,7±1,3	74,0
346-09	0	17,0±0,1	-	96,4±1,3	-
	30	16,7±0,6	98,2	100,6±1,3	104,3
	60	15,7±0,3	92,4	99,4±0,8	103,1
	90	14,6±0,5	85,9	92,0±2,5	95,4
Форвард / Forward	0	16,1±0,5	-	102,6±4,4	-
	30	16,5±0,2	102,5	108,5±1,3	105,7
	60	15,4±0,3	95,7	105,4±2,5	102,8
	90	13,1±1,1	81,4	102,8±1,7	100,2
Фермер 198-12 / Farmer 198-12	0	15,8±0,5	-	117,5±0,7	-
	30	17,4±0,1	110,1	111,9±0,4	95,3
	60	14,5±0,7	91,8	111,0±2,6	94,4
	90	12,8±0,6	81,0	95,4±1,7	81,2
29-11	0	14,4±0,3	-	125,0±1,5	-
	30	14,2±0,2	98,6	128,0±1,4	102,4
	60	13,4±0,1	93,1	133,1±0,9	106,5
	90	12,1±0,3	84,0	122,4±0,1	97,9
Бионик / Bionik	0	15,4±0,3	-	124,8±1,9	-
	30	14,9±0,4	96,8	105,2±1,4	84,3
	60	14,2±0,3	92,2	123,8±1,4	99,2
	90	13,4±0,4	87,0	112,2±1,7	89,9

Примечания: ИДК – индекс длины корней; ОМС – относительное массовое соотношение корней и побегов /  
 Notes: IRL – index of root length; RWR – relative weight ratio of roots and shoots.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными Н. М. Казниной с соавт., согласно которым с повышением концентрации тяжелых металлов в субстрате для выращивания растений происходит уменьшение значений показателя ОМС [14]. Например, внесение избыточной концентрации марганца в среду выращивания способствовало снижению значений соотношения корень/побег у риса, причем у чувствительного сорта в большей степени, чем у толерантного [15]. В нашей работе максимальное изменение было зафиксировано у сорта Фермер 198-12, у которого значение ОМС в контроле составило 117,5 %, а в опыте с добавлением 90 мг/л ионов марганца(II) – 95,4 %. В некоторых случаях наблюдалось увеличение изменения ОМС в опыте по отношению к контролю. В работе

С. Р. Zhou с соавт. также было выявлено увеличение значений данного показателя при воздействии повышенных концентраций ионов Mn(II) по сравнению с контролем на рост пшеницы [16]. Любое изменение, т. е. как снижение, так и повышение ОМС в опыте относительно контроля является адаптационным механизмом растений при воздействии стрессовых факторов.

На основе значений показателей ИДК и ОМС можно заключить, что исследованные сорта ячменя, по сравнению с Белгородским 100, более устойчивы к ионной токсичности марганца. Однако по морфометрическим параметрам роста среди исследованных сортов выделить наиболее устойчивого к марганцу сорта не удалось. С этой целью проведена оценка антиоксидантной активности растений.

По результатам исследований антиоксидантная активность СОД в корнях растений ячменя во всех вариантах опыта увеличилась по сравнению с контролем (табл. 2). Исключение составил сорт Бионик, для которого повышение значений данного показателя отмечали только в случае внесения 60,0 и 90,0 мг/л  $Mn^{2+}$ . Данный факт можно связать с активацией защитных механизмов ячменя при воздействии повышенных концентраций марганца на ранних стадиях его развития. Известно, что неблагоприятные факторы,

в том числе высокие концентрации тяжелых металлов, с одной стороны, способствуя накоплению в клетках растений активных форм кислорода, способны вызывать окислительные повреждения и, в конечном итоге, приводить к снижению продуктивности растений [11]. С другой стороны, у растений существует система детоксикации, то есть обезвреживания активных форм кислорода, в состав которой входит и фермент СОД [11]. Избыточные концентрации марганца способствуют увеличению активности СОД [4].

*Таблица 2 – Влияние марганца на АОА СОД в корнях 7-дневных ростков ячменя /  
Table 2 – The effect of manganese on AOA SOD in the roots of 7-day barley seedlings*

<i>Coptm / Variety</i>	$Mn^{2+}$ , мг/л $Mn^{2+}$ , mg/L	<i>АОА, %</i>	
		<i>значения / values</i>	<i>изменение / change</i>
Белгородский 100 / Belgorodskij 100	0	91,2±2,4	-
	30	98,1±0,6	107,5
	60	98,3±0,5	107,8
	90	98,7±0,1	108,3
346-09	0	85,5±2,5	-
	30	96,9±0,7	113,4
	60	98,6±0,1	115,4
	90	98,3±0,1	115,0
Форвард / Forward	0	65,5±7,8	-
	30	78,8±4,3	120,2
	60	84,1±3,3	128,4
	90	86,8±1,9	132,5
Фермер 198-12 / Farmer 198-12	0	52,4±0,4	-
	30	83,2±2,2	158,8
	60	87,6±2,0	167,2
	90	88,7±0,6	169,4
29-11	0	91,8±0,3	-
	30	93,8±0,7	102,1
	60	94,7±0,9	103,1
	90	93,5±1,0	101,8
Бионик / Bionik	0	92,0±1,2	-
	30	92,8±1,9	100,8
	60	95,0±0,2	103,2
	90	94,7±0,5	102,9

Наибольшие изменения значений АОА СОД в корнях фиксировали у сорта Фермер 198-12 (от 58,8 до 69,3 % относительно контроля), а наименьшие – у сортов 29-11 и Бионик. У сорта Белгородский 100 изменение антиоксидантной активности под действием ионов марганца(II) было ниже, чем у боль-

шинства других исследованных сортов ячменя, за исключением 29-11 и Бионик. Зависимости между значениями АОА и дозой марганца в среде для выращивания растений не было установлено. По изменению уровня АОА СОД в корнях все исследованные сорта ячменя отнесены к третьему типу, что говорит об их

чувствительности к изучаемому стрессовому фактору. По литературным данным, уровень антиоксидантов может отличаться не только у разных видов, но и у разных сортов [4, 15]. При этом активность ферментов у чувствительных сортов выше, чем у толерантных [17]. Следовательно, в наших исследованиях сорт Фермер 198-12 оказался наиболее чувствительным к повышенной концентрации  $Mn(II)$  по сравнению с другими сортами ячменя. Установленный факт отсутствия ингибирующего действия минимальной в опыте концентрации ионов марганца(II) на линейный рост корней исследованных сортов ячменя, в отличие от антиоксидантной активности, значения

которой при этом возросли, можно связать с биогенностью данного элемента.

В ходе исследования влияния марганца на АОА СОД в побегах 7-дневных проростков ячменя исследуемых сортов фиксировали её более высокие значения в опыте по сравнению с контролем (табл. 3). Зависимости между значениями АОА СОД в побегах проростков и дозой марганца, как и в случае корней, не было установлено. Полученные данные согласуются с результатами других исследователей, согласно которым активность антиоксидантных ферментов в присутствии тяжелых металлов, как правило, увеличивается, что способствует повышению уровня АОА и практически не зависит от концентрации металла [18].

*Таблица 3 – Влияние марганца на АОА СОД в побегах (7-дневных) и листьях (14-дневных) ячменя /*  
*Table 3 – The effect of manganese on AOA SOD in 7-day shoots and 14-day leaves of barley*

<i>Copt / Variety</i>	$Mn^{2+}$ , мг/л / $Mn^{2+}$ , mg/L	<i>AOA, %</i>			
		<i>побеги /</i> <i>shoots</i>	<i>изменение /</i> <i>change</i>	<i>листья /</i> <i>leaves</i>	<i>изменение</i> <i>/change</i>
Белгородский 100 / Belgorodskij 100	0	92,5±2,6	-	92,0±2,6	-
	30	98,4±0,1	106,3	93,8±1,4**	102,0
	60	98,3±0,4	106,2	88,9±1,4**	96,7
	90	98,4±0,7	106,4	89,2±3,1**	97,0
346-09	0	91,9±1,1	-	90,6±2,5	-
	30	96,8±0,2*	105,3	91,7±0,7**	101,3
	60	98,3±0,4	106,9	89,6±1,6**	98,9
	90	98,4±0,1	107,1	90,8±3,0**	100,3
Форвард / Forward	0	80,0±4,8*	-	84,8±5,1*	-
	30	81,2±2,7	101,5	94,5±1,1**	111,8
	60	80,8±5,6	101,0	94,0±0,8**	111,2
	90	73,0±8,7*	91,2	93,0±1,4**	110,1
Фермер 198-12 / Farmer 198-12	0	66,7±7,9	-	88,5±2,4**	-
	30	80,7±0,5	121,0	91,7±0,7**	103,6
	60	85,6±1,4	128,2	89,3±0,8***	101,0
	90	83,8±0,6*	125,6	86,3±4,0	97,5
29-11	0	85,1±2,9*	-	86,0±4,3*	-
	30	89,9±2,4*	105,7	96,1±1,5**	111,7
	60	91,8±1,3*	107,8	95,6±1,3***	111,2
	90	92,6±0,3	108,8	97,3±0,2**	113,1
Бионик / Bionik	0	88,1±1,4*	-	83,1±1,2**	-
	30	91,4±1,5	103,7	91,0±2,7	109,5
	60	92,1±1,4*	104,6	80,0±3,0**	96,3
	90	93,3±0,5*	106,0	81,1±0,8**	97,6

\* – достоверное отличие от АОА СОД в корнях; \*\* – в корнях и побегах; \*\*\* – в побегах /

\* – significant difference of AOA SOD in roots; \*\* – in roots and shoots; \*\*\* – in shoots

Из спектра исследованных сортов отличился Форвард, для которого отмечали отсутст-

вие достоверного влияния марганца на уровень АОА СОД в побегах. Наибольшее изменение

уровня АОА СОД во всех вариантах опыта по сравнению с контролем (121,0-128,6 %) было выявлено у сорта Фермер 198-12.

В отличие от побегов, уровень антиоксидантной активности СОД в листьях 14-дневных растений ячменя отличался у разных сортов (табл. 3). Так, для сортов Белгородский 100 и 346-09 отмечали отсутствие достоверных изменений в значениях АОА относительно контроля при добавлении марганца в среду для выращивания растений. Тогда как у сортов Форвард и 29-11 все исследуемые дозы марганца оказали значимое влияние на уровень АОА СОД в листьях, заключающееся в его повышении. У сортов Фермер 198-12 и Бионик достоверное повышение значения данного показателя наблюдали только в вариантах с концентрацией  $Mn^{2+}$  30,0 мг/л, что может быть связано с биогенностью исследуемого металла. Известно, что в живых организмах марганец входит в состав ферментов. Например, марганец содержит одна из изоформ фермента СОД, а именно –  $MnCOД$  [11].

У растений сорта Бионик фиксировали уменьшение антиоксидантной активности СОД в листьях под действием 90,0 мг/л  $Mn^{2+}$ . Отличия между значениями исследуемого параметра для побегов и листьев растений ячменя могут быть объяснены продолжительностью токсического воздействия ионов [19]. Кроме того, по данным литературы, возможны различия в активности антиоксидантных ферментов в зависимости от органов растений [17]. Наибольшее изменение уровня АОА СОД в листьях в вариантах опыта по сравнению с контролем было выявлено у сортов Форвард и 29-11 (110-113 %).

Таким образом, оценка антиоксидантного статуса растений ячменя большинства исследованных сортов на ранних стадиях развития (7 суток) позволила установить токсический эффект ионов марганца(II). Исключение составил сорт Форвард, который по изменению уровня АОА СОД в побегах был отнесен к категории индифферентных к стрессу растений, то есть устойчивых. По изменению АОА фермента в листьях наиболее устойчивыми к марганцу на ранних стадиях развития оказались сорта Белгородский 100 и 346-09.

Уровень антиоксидантной активности СОД в побегах всех исследованных в опыте сортов ячменя, кроме Белгородский 100,

достоверно отличился от такового в корнях. Данное отличие отмечали у сорта 346-09 в контрольном варианте, у сортов Форвард и Фермер 198-12 – в варианте опыта с максимальной концентрацией марганца, у сортов 29-11 и Бионик – во всех вариантах, за исключением 90 и 30 мг/л  $Mn^{2+}$  соответственно. В целом уровень АОА СОД в побегах либо достоверно не отличался, либо был ниже, чем в корнях. Изменение уровня АОА фермента в побегах в опыте по сравнению с контролем было выражено слабее, чем в корнях. С одной стороны, в некоторых работах имеются сведения о том, что активность антиоксидантных ферментов в побегах может быть выше, чем в корнях [17]. Однако тяжелые металлы поступают из почвы в растения через корни. Большинство растений, в том числе ячмень, относятся к группе исключателей, накапливающих тяжелые металлы преимущественно в корнях, в которых и происходит в первую очередь детоксикация ТМ [20]. Наименьшее отличие изменения уровня АОА СОД в корнях и побегах в опыте по сравнению с контролем было выявлено у сортов Белгородский 100 и Бионик.

По сравнению с данными по АОА СОД, полученными для 7-дневных проростков ячменя, значения АОА фермента в листьях 14-дневных растений отличались от таковых в корнях и побегах некоторых сортов. У сортов Белгородский 100, 346-09 и Бионик наблюдали уменьшение значений АОА СОД в листьях во всех вариантах опыта. Для Бионика исключение составил вариант опыта с наименьшей исследуемой в опыте концентрацией ионов марганца(II). У остальных сортов в большинстве вариантов опыта было выявлено увеличение уровня АОА СОД в листьях по сравнению с корнями и побегами.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что уровень антиоксидантной активности растений зависит не только от их возраста, но и органа растений. В надземной части растений ячменя уровень АОА СОД выражен слабее, чем в корнях.

**Выводы.** 1. Повышенные концентрации ионов марганца(II) оказывают влияние на морфометрические параметры роста растений и на антиоксидантную активность СОД в корнях, побегах и листьях ячменя.

2. По параметрам оценки корневой системы все исследованные сорта ячменя отно-



сятся к группе устойчивых (ИДК более 65 %). Однако с увеличением концентрации  $Mn^{2+}$  в среде выращивания происходит уменьшение длины корней.

3. Уменьшение значения ОМС у всех исследованных сортов относительно контроля было зафиксировано в варианте опыта с добавлением марганца 90 мг/л, что свидетельствует о нарушении развития растений ячменя при высоких концентрациях марганца. Исключение составил сорт Форвард, у которого изменение ОМС в опыте относительно контроля составило 100,2 %.

4. По морфометрическим параметрам (ИДК и ОМС) наиболее чувствительным к избытку марганца оказался стандартный сорт Белгородский 100.

5. По сравнению с контролем АОА СОД под действием марганца увеличивается во всех органах растений: корнях, побегах и листьях. Изменение АОА СОД в корнях большинства сортов в опыте по отношению к контролю было более значительным, чем в побегах и листьях.

6. По параметрам ОМС и АОА СОД наиболее чувствительным оказался сорт Фермер 198-12. Значение ОМС у растений данного сорта в контроле составило 117,5 %, тогда как в опыте с добавлением 90 мг/л ионов марганца(II) – 95,4 %. Изменение АОА СОД в корнях (% от контроля) составило 158,8; 167,2 и 169,4 % в соответствии с дозой марганца 30,0; 60,0 и 90,0 мг/л, а в побегах – 121,0; 128,3 и 125,6 % соответственно.

Таким образом, все исследованные сорта ячменя оказались устойчивыми к повышенным концентрациям марганца в дозах 30, 60 и 90 мг/л. Однако достоверное уменьшение длины корней и изменение ОМС свидетельствует об отрицательном влиянии данных концентраций элемента на проростки ячменя. Наибольшее повышение уровня АОА СОД в ответ на воздействие избытка  $Mn(II)$  у некоторых сортов (Форвард и Фермер 198-12), по сравнению с остальными, свидетельствует об их большей чувствительности к данному стрессу.

#### *Список литературы*

1. Schmidt S. B., Jensen P. E., Husted S. Manganese Deficiency in Plants: The Impact on Photosystem II. Trends in Plant Science. 2016; 21(7): 622-632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03.001>
2. Шихова Л. Н., Егошина Т. Л. Тяжелые металлы в почвах и растениях Северо-Востока европейской части России. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
3. Пугаев С. В. Геохимическое районирование пахотных почв республики Мордовия по содержанию тяжелых металлов. Достижения науки и техники АПК. 2015;(29(3)):28-32. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23200166>
4. Millaleo R., Reyes-Díaz M., Ivanov A. G., Mora M. L., Alberdi M. Mn as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. J. Soil Sci. Plant Nutr. 2010;10(4):476-494. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>
5. Santos E. F., Kondo Santini J. M., Paixão A. P., Júnior E. F., Lavres J., Campos M., Reis A. R. Dos. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. Plant Physiology and Biochemistry. 2017; 113: 6-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.022>
6. Zhou G., Delhaize E., Zhou M., Ryan P. R. Biotechnological Solutions for Enhancing the Aluminium Resistance of Crop Plants. Abiotic Stress in Plants – Mechanisms and Adaptations. 2011. P. 119-142.
7. Cox W., Levitt Y. Interrelations between environmental factors and resistance of cabbage leaves. Plant Physiol. 1976;57 (4):553-555.
8. Yost R. S. Plant Tolerance of Low Soil pH, Soil Aluminum, and Soil Manganese. Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture, 2000. Chapter 11. P. 113-115. URL: <https://www.ctahr.hawaii.edu>
9. Шуплецова О. Н., Широких И. Г. Повышение устойчивости ячменя к токсичности металлов и осмотическому стрессу путем клеточной селекции. Зерновое хозяйство России. 2015; (1): 57-62. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22994658>
10. Лисицын Е. М. Показатели развития корневых систем в эдафической селекции ячменя. Зернобобовые и крупяные культуры. 2018;(2(26)):66-71. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10019>
11. Загоскина Н. В., Назаренко Л. В. Активные формы кислорода и антиоксидантная система растений. Вестник Московского городского педагогического университета. Серия «Естественные науки». 2016; (2(22)):9-23. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26125309>
12. Зеленков В. Н., Марков М. В., Лапин А. А. Антиоксидантный статус растений, выявленный при изучении экосистем Тамбовской области. Экологические аспекты жизнедеятельности человека, животных и растений: монография. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. С. 177-195.
13. Navacode S., Weidner A., Varshney R. K., Lohwasser U., Scholz U., Roder M.S., Börner A. A genetic analysis of aluminium tolerance in cereals. Agric. Conspec. Sci. 2010;75 (4):191-196. URL: <https://hrcak.srce.hr/66006>



14. Казнина Н. М., Батова Ю. В., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф. Роль отдельных компонентов антиоксидантной системы в адаптации растений *Elytrigia repens* (L.) Nevski к кадмию. Труды Карельского научного центра РАН. 2016; (11): 17-26. DOI: <https://doi.org/10.17076/eb365>
15. Li P., Song A., Li Z., Fan F., Liang Y. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). Plant Soil. 2012;(354):407-419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1076-4>
16. Zhou C. P., Qi Y. P., You X., Yang L. T., Guo P., Ye X., Zhou X. X., Ke F. J., Chen L. S. Leaf cDNA-AFLP analysis of two citrus species differing in manganese tolerance in response to long-term manganese-toxicity BMC Genomics. 2013; (14:621): 1-19. URL: <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/14/621>
17. Rezai K., Farboodnia T. Manganese Toxicity Effects on Chlorophyll Content and Antioxidant Enzymes in Pea Plant (*Pisum sativum* L. c. v. qazvin). Agricultural Journal. 2008;(3(6)):454-458. URL: <http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/aj/2008/454-458.pdf>
18. Foyer C. H., Lopez-Delgado H., Dat J. F., Scott I. M. Hydrogen peroxide- and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signaling. Physiol. Plant. 1997;100:241-254. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04780.x>
19. Iannone M. F., Rosales E. P., Groppa M. D., Benavides M. P. Reactive oxygen species formation and cell death in catalase-deficient tobacco leaf disks exposed to cadmium. Protoplasma. 2010;245:15-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-009-0097-9>
20. Пищик В. Н., Воробьев Н. И., Проворов Н. А., Хомяков Ю. В. Механизмы адаптации растений к тяжелым металлам. Агрофизика. 2015; (2): 38-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23710052>

### References

1. Schmidt S. B., Jensen P. E., Husted S. Manganese Deficiency in Plants: The Impact on Photosystem II. Trends in Plant Science. 2016; 21(7): 622-632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03.001>
2. Shikhova L. N., Egoshina T. L. *Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Severo-Vostoka evropeyskoy chasti Rossii*. [Heavy metals in soils and plants of the North-East of the European part of Russia]. Kirov: Zonal'nyy NIISKh Severo-Vostoka, 2004. 264 p.
3. Pugaev S. V. *Geokhimicheskoe rayonirovanie pakhotnykh pochv respubliki Mordoviya po sodержaniyu tyazhelykh metallov*. [Geochemical zoning of arable soils in Mordovia according to heavy metal contents]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2015;(29(3)):28-32. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23200166>
4. Millaleo R., Reyes-Díaz M., Ivanov A. G., Mora M. L., Alberdi M. Mn as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and re-sistance mechanisms. J. Soil Sci. Plant Nutr. 2010;10(4):476-494. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>
5. Santos E. F., Kondo Santini J. M., Paixão A. P., Júnior E. F., Lavres J., Campos M., Reis A. R. Dos. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. Plant Physiology and Biochemistry. 2017;113:6-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.022>
6. Zhou G., Delhaize E., Zhou M., Ryan P. R. Biotechnological Solutions for Enhancing the Aluminium Resistance of Crop Plants. Abiotic Stress in Plants – Mechanisms and Adaptations. 2011. pp. 119-142.
7. Cox W., Levitt Y. Interrelations between environmental factors and resistance of cabbage leaves. Plant Physiol. 1976;57(4):553-555.
8. Yost R. S. Plant Tolerance of Low Soil pH, Soil Aluminum, and Soil Manganese. Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture, 2000. Chapter 11. pp. 113-115. URL: <https://www.ctahr.hawaii.edu>
9. Shchupletsova O. N., Shirokikh I. G. *Povyshenie ustoychivosti yachmenya k toksichnosti metallov i osmoticheskomu stressu putem kletochnoy seleksii*. [Increasing the resistance of barley to metal toxicity and osmotic stress by cell selection]. *Zernovoe khozyaystvo Rossi = Grain Economy of Russia*. 2015;(1):57-62. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22994658>
10. Lisitsyn E. M. *Pokazateli razvitiya kornevykh sistem v edaficheskoy seleksii yachmenya*. [Indexes of root system development for barley edaphic breeding]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury = Legumes and groat crops*. 2018; (2 (26)): 66-71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348Kh-2018-10019>
11. Zagorskina N. V., Nazarenko L. V. *Aktivnye formy kisloroda i antioksidantnaya sistema rasteniy*. [Active oxygen species and antioxidant system of plants]. *Vestnik Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo universiteta = Vestnik of Moscow City Teachers Training University. Seriya «Estestvennye nauki»*. 2016;(2 (22)):9-23. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26125309>
12. Zelenkov V. N., Markov M. V., Lapin A. A. *Antioksidantnyy status rasteniy, vyyavlenyy pri izuchenii ekosistem Tambovskoy oblasti*. [Antioxidant status of plants revealed in the study of ecosystems of the Tambov region]. *Ekologicheskie aspekty zhiznedeyatel'nosti cheloveka, zhivotnykh i rasteniy: monografiya*. [Environmental aspects of human, animal and plant life: monograph.]. Belgorod: ID «Belgorod» NIU «BelGU», 2017. pp. 177-195.

13. Navacode S., Weidner A., Varshney R. K., Lohwasser U., Scholz U., Roder M. S., Börner A. A genetic analysis of aluminium tolerance in cereals. *Agric. Conspec. Sci.* 2010; 75 (4): 191-196. URL: <https://hrcak.srce.hr/66006>
14. Kaznina N. M., Batova Yu. V., Titov A. F., Laydinen G. F. *Rol' ot del'nykh komponentov antioksidantnoy sistemy v adaptatsii rasteniy Elytrigia repens (L.) Nevski k kadmiyu*. [Role of individual components of the antioxidant system in the adaptation of *Elytrigia repens* (L.) Nevski plants to cadmium]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2016;(11):17-26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17076/eb365>
15. Li P., Song A., Li Z., Fan F., Liang Y. Silicon ameliorates manga-nese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil*. 2012; (354): 407-419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s1104-011-1076-4>
16. Zhou C. P., Qi Y. P., You X., Yang L. T., Guo P., Ye X., Zhou X. X., Ke F. J., Chen L. S. Leaf cDNA-AFLP analysis of two citrus species differing in manganese tolerance in response to long-term manganese-toxicity *BMC Genomics*. 2013; (14:621): 1-19. URL: <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/14/621>
17. Rezai K., Farboodnia T. Manganese Toxicity Effects on Chloro-phyll Content and Antioxidant Enzymes in Pea Plant (*Pisum sativum* L. c. v. qazvin). *Agricultural Journal*. 2008; (3(6)): 454-458. URL: <http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/aj/2008/454-458.pdf>
18. Foyer C. H., Lopez-Delgado H., Dat J. F., Scott I. M. Hydrogen peroxide- and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signaling. *Physiol. Plant*. 1997;100:241-254. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04780.x>
19. Iannone M. F., Rosales E. P., Groppa M. D., Benavides M. P. Reactive oxygen species formation and cell death in catalase-deficient tobacco leaf disks exposed to cadmium. *Protoplasma*. 2010;245:15-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-009-0097-9>
20. Pishchik V. N., Vorob'ev N. I., Provorov N. A., Khomyakov Yu. V. *Mekhanizmy adaptatsii rasteniy k tyazhelym metallam*. [Mechanisms of plant adaptation to heavy metals]. *Agrofizika*. 2015;(2):38-49. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23710052>

#### **Сведения об авторах**

✉ **Симонова Ольга Александровна**, кандидат с.-х. наук, научный сотрудник отдела эдафической устойчивости растений, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8326-0101>, e-mail: [simolga07@gmail.com](mailto:simolga07@gmail.com)

**Симонов Максим Васильевич**, кандидат техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ул. Московская, д. 36, г. Киров, Российская Федерация, e-mail: [mv\\_simonov@vyatsu.ru](mailto:mv_simonov@vyatsu.ru), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3805-9246>, e-mail: [simaksim@mail.ru](mailto:simaksim@mail.ru)

**Товстик Евгения Владимировна**, кандидат биол. наук, с.н.с. ЦК «Экологические технологии и системы», доцент кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ул. Московская, д. 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: [ev\\_tovstik@vyatsu.ru](mailto:ev_tovstik@vyatsu.ru), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>, e-mail: [tovstik2006@inbox.ru](mailto:tovstik2006@inbox.ru)

#### **Information about the authors**

✉ **Olga A. Simonova**, PhD in Agricultural science, researcher, the Department of Edaphic Plant Resistance, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Lenin St., 166a, Kirov, Russia, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8326-0101>, e-mail: [simolga07@gmail.com](mailto:simolga07@gmail.com)

**Maksim V. Simonov**, PhD in Engineering, associate professor, the Chair of Engineering Technology, Vyatka State University, Moskovskaya St., 36, Kirov, Russia, 610000, e-mail: [mv\\_simonov@vyatsu.ru](mailto:mv_simonov@vyatsu.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3805-9246>

**Evgeniya V. Tovstik**, PhD in Biology, senior researcher, the Center of Competence “Environmental Technologies and Systems”, associate professor at the Department of Basic Chemistry and Chemistry Training Methodology, Vyatka State University, Moskovskaya St., 36, Kirov, Russia, 610000, e-mail: [ev\\_tovstik@vyatsu.ru](mailto:ev_tovstik@vyatsu.ru),  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>, e-mail: [tovstik2006@inbox.ru](mailto:tovstik2006@inbox.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author