

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ ЦИНКА НА РОСТ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ОПТИМУМА И ГИПОТЕРМИИ

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

Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В лабораторных условиях исследовали влияние цинка в высокой концентрации (1000 мкМ) на рост и состояние фотосинтетического аппарата растений озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при оптимальной (22 °С) и пониженной (4 °С) температуре. Показано, что независимо от температуры цинк в изученной концентрации оказывает ярко выраженное негативное действие на растения, вызывая уменьшение содержания в листьях основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), снижение потенциальной квантовой эффективности фотосистемы II. Кроме того, при воздействии этого металла у проростков в опытных вариантах наблюдалось частичное закрывание устьиц и уменьшение площади устьичной щели. Указанные изменения, наряду с другими возможными изменениями и/или нарушениями физиологических процессов, приводили к снижению фотосинтетической активности и торможению роста растений. Однако при оптимальной температуре отрицательное воздействие цинка на проростки к концу опыта (3 сут) ослабевало. В частности, скорость фотосинтеза, а также накопление биомассы побегов достигали уровня, характерного для растений контрольного варианта. В условиях же гипотермии ингибирующий эффект, обусловленный одновременным действием этих двух стресс-факторов, который фиксировался по ряду изученных показателей роста (высота побега и надземная биомасса) и состояния фотосинтетического аппарата (содержание фотосинтетических пигментов, интенсивность фотосинтеза, оводненность тканей листа), напротив, усиливался. Обнаруженное в опыте в условиях действия оптимальной и низкой температуры примерно равное уменьшение значений максимального квантового выхода фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) связано, очевидно, со слабой зависимостью реакций световой фазы фотосинтеза от температуры.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L.; цинк; низкая положительная температура; рост; фотосинтез.

N. M. Kaznina, Yu. V. Batova, G. F. Laidinen, A. F. Titov. THE EFFECT OF ZINC ON THE GROWTH AND PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF WHEAT UNDER OPTIMAL AND HYPOTHERMIC CONDITIONS

The effect of zinc in a high concentration (1000 μM) on the growth and the photosynthetic apparatus of winter wheat plants (*Triticum aestivum* L.) was investigated in the laboratory

under optimal (22 °C) and low (4 °C) temperatures. It was shown that irrespective of the temperature, zinc in the stated concentration had a pronounced negative effect on the plants, causing a decrease in the content of the main photosynthetic pigments (chlorophylls and carotenoids) in the leaves, and a decline of the potential quantum efficiency of photosystem II. In addition, the exposure of the experimental plants to this metal caused a partial closure of stomata and a decrease of the stomatal pore size. These changes, along with other possible modifications and/or disruptions of physiological processes, inhibited the photosynthetic activity and growth of the plants. Where the temperature was optimal, however, the detrimental effect of zinc on the plants was attenuated toward the end of the experiment (3 days). Namely, the rate of photosynthesis, as well as the accumulation of shoot biomass reached a level typical of the control plants. Under hypothermic conditions, on the contrary, the inhibitory effect caused by the simultaneous action of these two stress factors, which was manifest in a number of the studied growth indices (shoot height and aboveground biomass) and the state of the photosynthetic apparatus (photosynthetic pigments content, rate of photosynthesis, leaf tissue water content) tended to build up. The approximately equal decrease in the values of the maximum quantum yield of the PS II photochemical activity (F_v/F_m) detected experimentally under temperature optimum and hypothermia is obviously connected with the weak dependence of light-dependent reactions on temperature.

Key words: *Triticum aestivum* L.; heavy metals; low positive temperature; photosynthesis.

Введение

Среди основных загрязнителей окружающей среды из группы тяжелых металлов наиболее широко распространенным является цинк [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 2012]. Несмотря на то что этот металл относится к жизненно необходимым для растений микроэлементам, в высоких концентрациях он способен вызывать серьезные нарушения в их жизнедеятельности. Так, при увеличении содержания цинка в почве замедляются рост и развитие растений, снижается интенсивность фотосинтеза и дыхания, нарушается водный обмен, в результате заметно уменьшается продуктивность растений [Титов и др., 2007; Казнина и др., 2010; Vassilev et al., 2011]. В этой связи в настоящее время в целом ряде стран активно изучается влияние высоких концентраций этого металла на культурные виды растений, включая представителей семейства *Poaceae*, многие из которых относятся к ведущим сельскохозяйственным культурам. Однако следует подчеркнуть, что в большинстве случаев такого рода исследования проводятся при оптимальных или близких к ним температурах. Хотя в естественных условиях, особенно в северных регионах, в период активной вегетации нередко периодические (от нескольких часов до нескольких суток) понижения температуры до низких положительных и даже отрицательных значений, что вызывает у растений многочисленные изменения, затрагивающие так или иначе все их наиболее важные жизненные функции.

Учитывая это, задача настоящего исследования заключалась в сравнительном изучении воздействия высокой концентрации цинка в корнеобитаемой среде на основные физиологические процессы – рост и фотосинтез – у растений пшеницы при оптимальной и низкой положительной температурах.

Материалы и методы

Объектом исследования служили растения озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с. Московская 39, которые выращивали в камере искусственного климата в рулонах фильтровальной бумаги при температуре 22 °C, относительной влажности воздуха 60–70 %, ФАР 100 мкмоль/(м²·с), 14-часовом фотопериоде, на питательном растворе Хогланда – Арнона с добавлением микроэлементов, в том числе цинка в концентрации 2 мкМ (контрольный вариант). В опытном варианте к питательному раствору добавляли цинк в концентрации 1000 мкМ в форме сульфата (Zn²⁺, 22 °C). Спустя 7 сут часть растений этого варианта переносили на 1 или 3 сут в камеру с температурой 4 °C (Zn²⁺, 4°C), а другие оставляли в прежних условиях (22 °C). Влияние цинка на рост растений в условиях действия оптимальной и низкой температур оценивали по изменению (по отношению к контролю) высоты и биомассы побега. О воздействии металла на фотосинтетический аппарат (ФСА) судили на основе анализа содержания фотосинтетических пигментов, фотохимической активности фотосистемы II (ФС II), площади устьичной щели и интенсивности фотосинтеза.

Сухую биомассу растений измеряли после высушивания при 105 °С до постоянного сухого веса. Содержание пигментов определяли на спектрофотометре (СФ-2000), экстрагируя 80%-м ацетоном [Шлык, 1971]. Интенсивность фотосинтеза анализировали по выделению CO₂ на установке для исследования CO₂-газообмена и водяных паров HCM-1000 (Walz, Германия). Максимальный квантовый выход фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) измеряли с помощью флуориметра MINI-PAM (Walz, Германия) на адаптированных к темноте листьях. Измерение размеров устьичной щели проводили на нижнем эпидермисе листа методом отпечатков с использованием светового микроскопа Микмед 2 (ЛОМО, Россия) и окуляр-микрометра [Жолкевич, Пильщикова, 1989].

Биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла для разных показателей от 3 до 10 растений, аналитическая повторность 3–4-кратная. Весь опыт повторяли дважды. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Стьюдента при $p < 0,05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании ЦКП НО ИБ КарНЦ РАН «Комплексные фундаментальные и прикладные исследования особенностей функционирования живых систем в условиях Севера».

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали, что цинк в концентрации 1000 мкМ оказывает ярко выраженное негативное воздействие на рост и фотосинтетический аппарат пшеницы, при этом при кратковременном (1 и 3 сут) понижении температуры до 4 °С изученные показатели уменьшались в большей степени, чем при оптимальной. В частности, если при 22 °С у растений в присутствии цинка высота побега и накопление надземной биомассы уменьшались по сравнению с контролем на 18–25 %, то при действии низкой температуры уже через

1 сут оба показателя снижались почти на 40 % (табл. 1). Важно отметить, что при оптимальной температуре отрицательное воздействие цинка на рост проростков несколько ослабевало к концу опыта, тогда как при температуре 4 °С ингибирующий эффект, обусловленный одновременным действием этих двух стресс-факторов в отношении изученных показателей, напротив, усиливался.

Из литературных данных следует, что отрицательное влияние высоких концентраций цинка на рост может быть обусловлено как его непосредственным воздействием на клеточное деление и растяжение, что характерно для тяжелых металлов, так и опосредованным влиянием на другие физиологические процессы, в частности фотосинтез и водный обмен [Казнина и др., 2009; Jain et al., 2010; Серегин и др., 2011]. При этом хорошо известно, что условия минерального питания и температура в значительной степени влияют на состояние фотосинтетического аппарата [Магомедова и др., 2008]. В наших исследованиях при температуре 22 °С ингибирование фотосинтеза под влиянием цинка составляло около 20 %, однако к концу эксперимента скорость этого процесса практически не отличалась от контроля. В условиях гипотермии уже через 1 сут наблюдалось резкое торможение скорости фотосинтеза (на 60 % по отношению к контролю), которое еще более усиливалось через 3 сут (рис.).

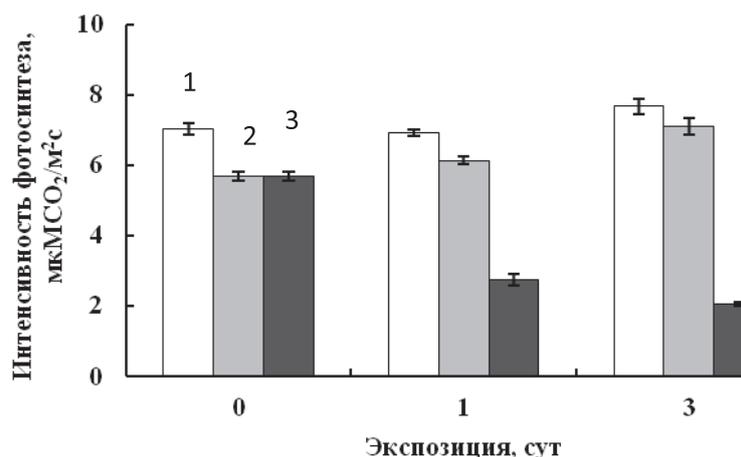
Снижение скорости фотосинтеза у растений сопровождалось уменьшением содержания фотосинтетических пигментов в обоих вариантах опыта, но было более явно выражено в варианте с низкой температурой (табл. 2). При этом если при температуре 22 °С содержание хлорофиллов уменьшалось в большей степени, чем каротиноидов, то при воздействии температуры 4 °С наблюдалось заметное понижение концентрации обеих форм пигментов.

В более ранних исследованиях нами было обнаружено, что ФСА злаков, в частности

Таблица 1. Влияние цинка (1000 мкМ) на рост растений пшеницы с. Московская 39 при оптимальной (22 °С) и пониженной (4 °С) температурах

Экспозиция, сут	Контроль, 22 °С	Zn ²⁺ , 22 °С	Zn ²⁺ , 4 °С
Высота побега, см			
0	18,1 ± 0,4	12,8 ± 0,5*	12,8 ± 0,5*
1	18,0 ± 0,5	14,3 ± 0,5*	12,0 ± 0,5*
3	23,5 ± 0,5	17,7 ± 0,5*	14,8 ± 0,4*
Сухая биомасса побега, мг			
0	14,5 ± 0,5	11,9 ± 0,7*	11,9 ± 0,7*
1	16,4 ± 0,6	12,2 ± 0,7*	10,3 ± 0,7*
3	19,4 ± 1,1	19,1 ± 1,2	15,3 ± 0,5*

Примечание. * Отличия от контроля достоверны при $p < 0,05$ (для табл. 1, 2, 3).



Влияние цинка (1000 мкМ) на интенсивность фотосинтеза у растений пшеницы с. Московская 39 при оптимальной (22 °С) и пониженной (4 °С) температурах. 1 – контроль, 2 – Zn²⁺, 22 °С, 3 – Zn²⁺, 4 °С

ячменя и овса, довольно устойчив к высоким концентрациям цинка в корнеобитаемой среде [Казнина, 2016]. При этом поддержание относительно высокой скорости фотосинтеза обеспечивается целым рядом адаптационных изменений в ФСА, среди которых одним из важных является сохранение высокого уровня каротиноидов. Поскольку каротиноиды выполняют в процессе фотосинтеза ряд важных функций, в том числе антиоксидантную, обеспечивая защиту клетки от повышения уровня активных форм кислорода, а также участвуют в стабилизации мембран хлоропластов, значительное уменьшение их содержания (почти на 50 %), отмеченное у растений при одновременном действии цинка и низкой температуры, не могло не сказаться отрицательно на скорости этого процесса.

Еще одной возможной причиной снижения интенсивности фотосинтеза в неблагоприятных условиях среды являются нарушения,

затрагивающие его световые реакции. Нами был измерен показатель F_v/F_m , который отражает потенциальную квантовую эффективность ФС II и используется в качестве надежного индикатора фотохимической активности ФСА [Гольцев и др., 2016]. Полученные результаты показали некоторое уменьшение под влиянием цинка значений F_v/F_m , причем примерно равное в условиях действия оптимальной и низкой температуры, что свидетельствует об определенных изменениях в ФС II, связанных с развитием стрессового состояния растений (табл. 2). Отсутствие различий по данному показателю между вариантами опыта с температурой 22 и 4 °С можно объяснить слабой зависимостью многих реакций световой фазы фотосинтеза от температуры.

Отметим также, что в неблагоприятных условиях внешней среды замедление скорости фотосинтеза у C₃-растений может быть связано с частичным или полным закрыванием

Таблица 2. Влияние цинка (1000 мкМ) на некоторые показатели ФСА растений пшеницы с. Московская 39 при оптимальной (22 °С) и пониженной (4 °С) температурах

Экспозиция, сут	Контроль, 22 °С	Zn ²⁺ , 22 °С	Zn ²⁺ , 4 °С
Содержание хлорофиллов (a+b), мг/г сырой массы			
0	1,794 ± 0,005	1,509 ± 0,013*	1,509 ± 0,013*
1	2,336 ± 0,014	1,759 ± 0,012*	1,375 ± 0,018*
3	1,841 ± 0,019	1,331 ± 0,003*	1,320 ± 0,025*
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы			
0	0,424 ± 0,004	0,295 ± 0,005*	0,295 ± 0,005*
1	0,416 ± 0,005	0,432 ± 0,002	0,221 ± 0,002*
3	0,341 ± 0,001	0,302 ± 0,001*	0,184 ± 0,006*
<i>F_v/F_m</i>			
0	0,790 ± 0,002	0,781 ± 0,001*	0,781 ± 0,001*
1	0,790 ± 0,002	0,780 ± 0,002*	0,778 ± 0,001*
3	0,787 ± 0,001	0,780 ± 0,002*	0,777 ± 0,001*

Таблица 3. Влияние цинка (1000 мкМ) на площадь устьичной щели и оводненность тканей листа у растений пшеницы с. Московская 39 при оптимальной (22 °С) и пониженной (4 °С) температурах

Экспозиция, сут	Контроль	Zn ²⁺ , 22 °С	Zn ²⁺ , 4 °С
Площадь устьичной щели, мкм ²			
0	576,7 ± 25,6	520,2 ± 32,7	520,2 ± 32,7
1	576,5 ± 26,6	426,2 ± 20,1*	488,1 ± 16,9*
3	568,5 ± 20,1	412,0 ± 11,0*	401,0 ± 17,2*
Оводненность тканей побега, %			
0	89,1 ± 0,2	88,5 ± 0,2	88,5 ± 0,2
1	90,0 ± 0,1	89,5 ± 0,2	88,7 ± 0,2*
3	90,6 ± 0,1	88,7 ± 0,2*	88,4 ± 0,2*

устьиц, что является важным механизмом их адаптации, обеспечивающим сохранение оводненности клеток и тканей за счет снижения интенсивности транспирации. В присутствии тяжелых металлов, в том числе цинка, закрывание устьиц может быть результатом нарушений в устьичном аппарате, в частности, вследствие изменения проницаемости мембран замыкающих клеток или резкого увеличения уровня АБК [Barceló et al., 1988; Караваев и др., 2001; Khudsar et al., 2004]. Кроме того, в наших опытах у растений под влиянием цинка вне зависимости от температуры отмечено уменьшение (почти на 30 % по сравнению с контролем) площади устьичной щели (табл. 3), которое, очевидно, является защитно-приспособительной реакцией растений, направленной на сохранение необходимого уровня воды в тканях. Видимо, поэтому при оптимальной температуре снижение оводненности тканей листа под влиянием цинка наблюдалось только к концу опыта, а при температуре 4 °С – уже через сутки от начала воздействия (табл. 3).

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что при действии цинка в высокой концентрации (1000 мкМ) у пшеницы как при оптимальной (22 °С), так и при низкой (4 °С) температуре уменьшается содержание фотосинтетических пигментов, снижается активность ФС II, а также происходит частичное закрывание устьиц и уменьшение площади устьичной щели, что наряду с другими возможными изменениями приводит к замедлению скорости фотосинтеза и торможению роста растений. Однако при температуре 22 °С указанные изменения носят обратимый характер, и к концу эксперимента (3 сут) скорость фотосинтеза и накопление биомассы побегов достигают уровня, характерного для растений контрольного варианта. В условиях гипотермии негативный эффект цинка на рост и фотосинтез

растений заметно усиливается, что, по крайней мере отчасти, связано с более существенным снижением содержания фотосинтетических пигментов, а также с уменьшением оводненности тканей листа.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания (тема № 0221-2014-0032).

Литература

- Гольцев В. Н., Каладжи Х. М., Паунов М., Баба В., Хорачек Т., Мойски Я., Коцел Х., Аллахвердиев С. И. Использование переменной флуоресценции хлорофилла для оценки физиологического состояния фотосинтетического аппарата растений // Физиология растений. 2016. Т. 63, № 6. С. 881–907.
- Жолкевич В. Н., Пильщикова Н. В. Методы изучения транспирации и состояния устьиц // Водный обмен растений. М.: Наука, 1989. С. 152–167.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск: СО РАН, 2012. 220 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 440 с.
- Казнина Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Росеае* к тяжелым металлам: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. СПб., 2016. 48 с.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Таланов А. В. Устойчивость щетинника зеленого к повышенным концентрациям цинка // Изв. РАН. Сер. биол. 2009. № 6. С. 677–684.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Батова Ю. В. Влияние цинка на продуктивность ярового ячменя в вегетационном опыте // Агробиология. 2010. № 8. С. 72–76.
- Караваев В. А., Баулин А. М., Гордиенко Т. В., Довыдьков С. А., Тихонов А. Н. Изменение фотосинтетического аппарата в листьях бобов в зависимости от содержания тяжелых металлов в среде выращивания // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 1. С. 47–54.
- Магомедова М. Х.-М., Мамаев А. Т., Алиева М. Ю. Влияние условий минерального питания

на флуоресценцию, фотосинтетическую активность и ростовые параметры растений // Юг России: экология, развитие. 2008. № 2. С. 52–56.

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.

Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдinen Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 170 с.

Шлык А. А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биологические методы в физиологии растений. М.: Наука, 1971. С. 154–170.

Barceló J., Vázquez M. D., Poschenrieder C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium-treated

bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) // New Phytol. 1988. Vol. 108. P. 37–49.

Jain R., Strivastava S., Solomon S., Strivastava 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. Vol. 32. P. 979–986.

Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M., Sairam R. K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua* // Biol. Plant. 2004. Vol. 48. P. 255–260.

Vassilev A., Nikolova A., Koleva L., Lidon F. Effects of excess Zn on growth and photosynthetic performance of young bean plants // J. Physiol. 2011. Vol. 3, no. 6. P. 58–62.

Поступила в редакцию 28.06.2017

References

Gol'tsev V. N., Kaladzhi X. M., Paunov M., Baba V., Khorachek T., Moiski Ya., Kotsel Kh., Allakhverdiev S. I. Ispol'zovanie peremennoi fluorestsentsii khlorofilla dlya otsenki fiziologicheskogo sostoyaniya fotosinteticheskogo apparata rastenii [The use of variable chlorophyll fluorescence for assessing the state of photosynthetic apparatus of plants]. *Fiziologiya rastenii* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2016. Vol. 63, no. 6. P. 881–907

Il'in V. B. Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva – rastenie [Heavy metals and nonmetals in a soil – plant system]. Novosibirsk: Publ. SB RAN, 2012. 220 p.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Microelements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989. 440 p.

Karavaev V. A., Baulin A. M., Gordienko T. V., Dovydkov S. A., Tikhonov A. N. Izmenenie fotosinteticheskogo apparata list'ev bobov v zavisimosti ot sodержaniya tyazhelykh metallov v srede vyrashchivaniya [Changes in photosynthetic apparatus of bean leaves depending on heavy metals content in growth medium]. *Fiziologiya rastenii* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2001. Vol. 48, no. 1. P. 47–54.

Kaznina N. M. Fiziologo-biokhimiicheskie i molekulyarno-geneticheskie mekhanizmy ustoychivosti rastenii semeistva Poaceae k tyazhelym metallam [Physiological, biochemical, and molecular-genetic mechanisms of the Poaceae family tolerance to heavy metals]: DSc (Dr. of Biol.) thesis. St. Petersburg, 2016. 48 p.

Kaznina N. M., Titov A. F., Laidinen G. F., Batova Ya. V. Vliyanie tsinka na produktivnost' yarovogo yachmenya v vegetatsionnom opyte [Effect of zinc on the yield of spring barley in a pot experiment]. *Agrokhi-miya* [Agric. Chem.]. 2010. No. 8. P. 72–76.

Kaznina N. M., Titov A. F., Laidinen G. F., Talanov A. V. Ustoychivost' shchetinnika zelenogo k povyshennym koncentratsiyam tsinka [*Setaria viridis* tolerance to high zinc concentrations]. *Izv. RAN. Ser. Biol.* [Biol. Bull.]. 2009. No. 6. P. 677–684.

Magomedova M. Kh.-M., Mamaev A. T., Alieva M. Ya. Vliyanie uslovii mineral'nogo pitaniya na fluorestsentsiyu, fotosinteticheskuyu aktivnost' i rostovye parametry rastenii [Impact of mineral nutrition on fluore-

science, photosynthetic activity, and growth parameters of plants]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [The South of Russia: Ecology, Development]. 2008. No. 2. P. 52–56.

Seregin I. V., Kozhevnikova A. D., Gracheva V. V., Byстрова E. I., Ivanov V. B. Raspre-delenie tsinka po tkanyam kornya prorostkov kukuruzy i ego deistvie na rost [Zinc distribution in root tissues of maize seedlings and its impact on growth]. *Fiziologiya rastenii* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2011. Vol. 58, no. 1. P. 85–94.

Shlyk A. A. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'ev [Determination of chlorophylls and carotenoids in green leaves extracts]. *Biologicheskie metody v fiziologii rastenii* [Biol. Methods Plant Physiol.]. Moscow: Nauka, 1971. P. 154–170.

Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F. Ustoychivost' rastenii k tyazhelym metallam [Plants tolerance to heavy metals]. Petrozavodsk: KarRC of RAS. 2007. 170 p.

Zholkevich V. N., Pil'shikova N. V. Metody izucheniya transpiratsii i sostoyaniya ust'its [Methods of studying transpiration and stomata]. *Vodnyi obmen rastenii* [Water Exch. Plants]. Moscow: Nauka, 1989. P. 152–167.

Barceló J., Vázquez M. D., Poschenrieder C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium-treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *New Phytol.* 1988. Vol. 108. P. 37–49.

Jain R., Strivastava S., Solomon S., Strivastava 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. Vol. 32. P. 979–986.

Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M., Sairam R. K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biol. Plant.* 2004. Vol. 48. P. 255–260.

Vassilev A., Nikolova A., Koleva L., Lidon F. Effects of excess Zn on growth and photosynthetic performance of young bean plants. *J. Physiol.* 2011. Vol. 3, no. 6. P. 58–62.

Received June 28, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Казнина Наталья Мстиславовна

ведущий научный сотрудник, д. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: kaznina@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

Батова Юлия Валерьевна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: batova@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

Титов Александр Федорович

главный научный сотрудник
отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
руководитель лаб. экологической
физиологии растений, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: titov@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 769710

Лайдинен Галина Федоровна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: laidinen@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

CONTRIBUTORS:

Kaznina, Natalia

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: kaznina@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706

Batova, Yulia

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: batova@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706

Titov, Alexander

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910
Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: titov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 769710

Laidinen, Galina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: laidinen@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706