

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF PLANTS

УДК 581.2

doi:10.21685/2307-9150-2022-2-1

Влияние различных концентраций ионов тяжелых металлов на каллусогенез и генерацию супероксидного анион-радикала в каллусах огурца и редиса

И. Д. Михайлова¹, А. С. Лукаткин²

¹АО «Биохимик», Саранск, Россия

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

¹irinamihajlova113@gmail.com, ²aslukatkin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Влияние тяжелых металлов (ТМ) на растения *in vivo* детально изучено в отличие от действия ТМ на культуры растительных клеток. В то же время известно, что ответные реакции на стресс у растений и в культуре клеток могут очень сильно различаться. В связи с этим необходимо подробное изучение устойчивости культур клеток *in vitro* к ТМ с последующей разработкой способов повышения металлоустойчивости растений. Цель исследования – изучить воздействие различных доз ионов ТМ – меди, никеля, цинка и свинца в среде культивирования на каллусообразование и генерацию супероксидного анион-радикала в каллусах огурца и редиса. *Материалы и методы.* В качестве объекта исследования были взяты каллусы огурца (*Cucumis sativus* L., сорт Единство) и редиса (*Raphanus sativus* L., сорт Красный великан). Эксперимент включал в себя получение каллусной культуры огурца и редиса с последующей пересадкой на среду Мурасиге – Скуга, содержащую соли ТМ в концентрациях от 10 мкМ до 1 мМ. Ионы тяжелых металлов в низких концентрациях стимулировали образование и рост каллусов, тогда как в высоких сильно угнетали каллусогенез и рост. Приведен ряд токсичности ТМ для каллусов редиса и огурца. *Результаты.* Длительное (4–6 недель) выращивание каллусных культур на средах с добавлением различных доз ионов ТМ дифференцированно влияло на скорость генерации супероксидного анион-радикала. *Выводы.* Выявлено неодинаковое влияние ионов ТМ и их концентраций на генерацию супероксида в каллусах огурца и редиса, что может свидетельствовать о процессах адаптации к ТМ культур *in vitro*.

Ключевые слова: огурец, редис, тяжелые металлы, каллус, рост, супероксидный анион-радикал

Для цитирования: Михайлова И. Д., Лукаткин А. С. Влияние различных концентраций ионов тяжелых металлов на каллусогенез и генерацию супероксидного анион-радикала в каллусах огурца и редиса // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 3–11. doi:10.21685/2307-9150-2022-2-1

© Михайлова И. Д., Лукаткин А. С., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The effect of different concentrations of heavy metals ions on the callusogenesis and generation of superoxide cucumber and radish calluses

I.D. Mikhaylova¹, A.S. Lukatkin²

¹Joint-stock company “Biokhimik”, Saransk, Russia

²Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

¹irinamihajlova113@gmail.com, ²aslukatkin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The effect of heavy metals (HM) on plants *in vivo* has been studied in detail, in contrast to the effect of HM on plant cell cultures. At the same time, it is known that responses to stress in a plant and cell culture can vary greatly. In this regard, it is necessary to study in detail the resistance of cell cultures *in vitro* to HM, followed by the development of ways to increase the metal resistance of plants. The purpose of the work is to study the effect of various doses of HM – copper, nickel, zinc and lead ions in the culture medium on callus formation and generation of superoxide anion radical in cucumber and radish callus. *Materials and methods.* The callus of cucumber (*Cucumis sativus* L., variety Unity) and radish (*Raphanus sativus* L., variety Red Giant) were taken as the object of the study. The experiment included obtaining a callus culture of cucumber and radish, followed by transplantation to a Murashige-Skuga medium (MS) containing TM salts in concentrations from 10 mcM to 1 mM. Ions of heavy metal in low concentrations stimulated the formation and growth of callus, while in high concentrations strongly inhibited callus formation and growth. A number of HM toxicity for radish and cucumber calluses is given. *Results.* Long-term (4-6 weeks) cultivation of callus cultures on media with the addition of various doses of HM ions had a differentiated effect on the rate of generation of superoxide anion radical. *Conclusions.* The unequal influence of HM ions and their concentrations on the generation of superoxide in cucumber and radish callus was revealed, which may indicate the processes of adaptation to HM cultures *in vitro*.

Keywords: cucumber, radish, heavy metals, callus, growth, superoxide anion

For citation: Mikhaylova I.D., Lukatkin A.S. The effect of different concentrations of heavy metals ions on the callusogenesis and generation of superoxide cucumber and radish calluses. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2022;(2):3–11. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2022-2-1

Введение

В последнее время условия жизни растений усложняются в связи с глобальными климатическими процессами на Земле, которые сопровождаются усилением антропогенной нагрузки. В связи с этим возникает необходимость в точной оценке адаптивного потенциала культурных растений, которая невозможна без изучения их устойчивости и повреждения при стрессовых воздействиях окружающей среды [1].

Одним из токсикантов, действующих на культурные растения, являются ТМ, и их действие постоянно усиливается с возрастанием антропогенной нагрузки на экосистемы. Большинство овощных растений выращивается в непосредственной близости от городов, что может способствовать поступлению больших доз ТМ в растения, вызывающих нарушения физиологических процессов. Поэтому оценка резистентности к ТМ видов и сортов культурных растений имеет большое значение, особенно в плане повышения устойчиво-

сти посредством клеточной селекции [1, 2]. В результате клеточной селекции были получены газонные травы, устойчивые к ионам кадмия и свинца [2], растения-регенеранты сахарного тростника, обладающие устойчивостью к соли кадмия [3].

Использование культуры *in vitro* дает возможность изучения влияния стрессовых факторов на растение на клеточном уровне. Показано, что клеточные культуры являются хорошим объектом для решения задач оценки токсического действия ТМ на растительные объекты [1–3].

Известно, что действие некоторых ТМ (в частности, ионов меди) вызывает в растениях и клеточных культурах состояние окислительного стресса [4–6]. При этом выявлено повышение уровня генерации супероксидного анион-радикала ($O_2^{\bullet-}$), усиление интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ), изменение активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, каталазы, аскорбат-пероксидазы) [4, 5]. В суспензионной культуре клеток *Nicotiana tabacum* L. наблюдали быстрое концентрационно-зависимое накопление H_2O_2 , индуцированное избыточной концентрацией ионов Cu^{2+} (до 100 мкМ) [6].

В связи с этим целью работы было исследование эффектов различных доз ионов ТМ (меди, никеля, цинка и свинца) в среде культивирования на каллусообразование, рост и генерацию $O_2^{\bullet-}$ в каллусных культурах огурца и редиса.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были взяты каллусы огурца (*Cucumis sativus* L., сорт Единство) и редиса (*Raphanus sativus* L., сорт Красный великан).

Эксперимент включал в себя следующие этапы:

1. Получение каллусной культуры. Выраженные из простерилизованных семян растения эксплантировали на питательную среду Мурасиге – Скоуга (МС), содержащую 7,5 г/л агар с добавлением регуляторов роста 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) в концентрациях от 1 до 5 мг/л и 6-бензиламинопурина (6-БАП) в концентрациях от 0,5 до 2 мг/л;

2. Изучение влияния ТМ на каллусогенез огурца и редиса в эксперименте прямого помещения эксплантов (гипокотилей) на среду МС, дополнительно содержащую соли ТМ ($NiSO_4 \times 7H_2O$, $ZnSO_4 \times 7H_2O$, $CuSO_4 \times 5H_2O$, $Pb(NO_3)_2$) в концентрациях 10 мкМ, 0,1 мМ, 1 мМ, с последующей оценкой каллусогенеза и роста каллусов.

3. Пересадка полученных каллусов на среды МС с добавлением различных концентраций (10 мкМ, 0,1 мМ, 1 мМ) солей ТМ. Каллусы выращивали в течение 4–6 недель в термостате при температуре 21–22°C, после чего оценивали влияние различных доз тяжелых металлов на каллусы огурца и редиса, которое определяли по скорости генерации супероксидного анион-радикала [7]. В опытах было не менее 10 каллусов каждого варианта. В таблицах приведены средние из всех опытов с их стандартными ошибками.

Результаты

Влияние ТМ на каллусогенез и рост каллусов огурца и редиса

Для оценки влияния различных ТМ на образование и рост каллусов брали экспланты (гипокотиль) огурца и редиса и высаживали на среды МС с добавлением ионов ТМ; через четыре недели роста оценивали результат.

Ионы меди угнетающе действовали на каллусогенез в эксперименте с эксплантами огурца. Подобные реакции наблюдались в каллусных побегах *Daphne jasminea* [8], каллусах *Belamcanda chinensis* [9]. При высокой концентрации Cu^{2+} (1 мМ) нарастания каллуса не происходило; при более низких концентрациях ионов меди в среде наблюдалось незначительное увеличение каллусной культуры; во всех вариантах опыта цвет ткани менялся со светло-желтого на темно-желтый (рис. 1).

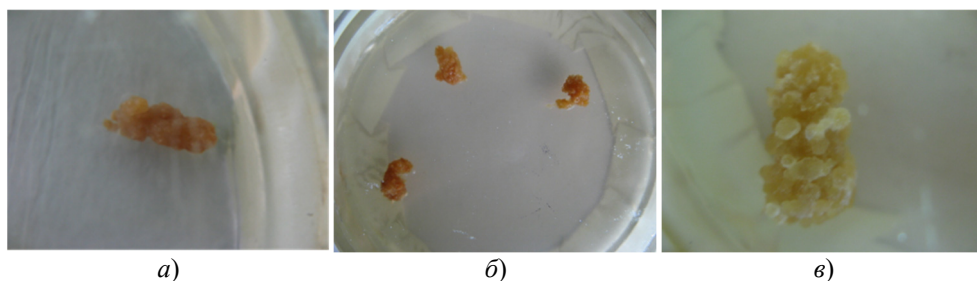


Рис. 1. Каллусогенез на эксплантах огурца на средах с разным содержанием ионов меди: а – 1 мМ; б – 0,1 мМ; в – 10 мкМ

Для каллусов редиса показано, что на среде, содержащей 1 мМ Cu^{2+} , они не росли и характеризовались очень слабым каллусогенезом; концентрация 0,1 мМ Cu^{2+} не оказала выраженного токсического эффекта на образование и рост каллусов; на среде с добавлением 10 мкМ Cu^{2+} экспланты редиса обрастали каллусом быстрее и сильнее относительно контроля, а пересадочные каллусы имели наибольший размер и более интенсивную окраску (рис. 2).

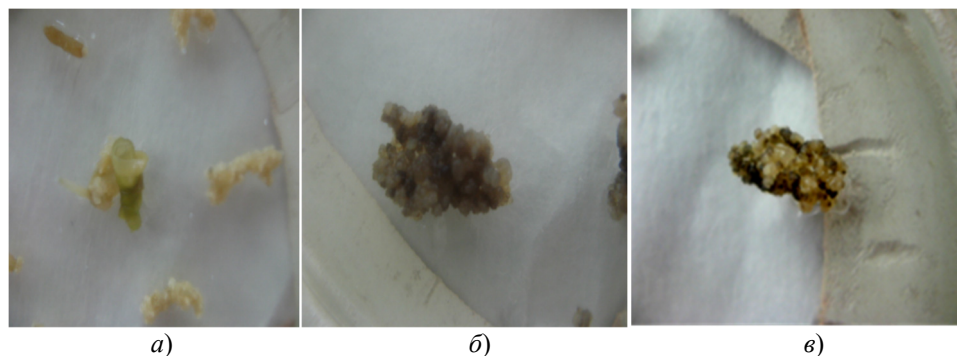


Рис. 2. Каллусогенез на эксплантах редиса на среде с содержанием ионов меди: а – 1 мМ; б – 0,1 мМ; в – 10 мкМ

У эксплантов огурца на среде с низким содержанием ионов Ni^{2+} наблюдали интенсивный каллусогенез (чего не происходило на средах с более высокой концентрацией никеля). Рост каллусной культуры огурца, пересаженной на среду МС, содержащую ионы никеля, практически не наблюдался, за исключением среды с низким содержанием Ni^{2+} . В опыте с редисом при добавлении в среду МС ионов Ni^{2+} в концентрации 1 мМ наблюдали замедленное образование каллусной ткани мелкозернистой структуры. Каллусы редиса, выращенные на среде с добавлением 1 мМ Ni^{2+} , имели больший размер по сравнению с каллусами, выращенными на среде с внесением 1 мМ Cu^{2+} , но

меньший по сравнению с контролем. Каллусы, выращенные на среде с добавлением 10 мкМ Ni^{2+} , существенно не отличались от таковых, выращенных на среде с добавлением ионов Cu^{2+} .

Ионы свинца не оказали негативного влияния на каллусогенез и рост каллусной ткани огурца, а в средней и низкой концентрациях даже стимулировали рост каллусной ткани. Концентрация 1 мМ Pb^{2+} приводила к угнетению роста каллусов огурца и изменению цвета каллусной культуры со светло-желтого до насыщенного желтого. У редиса не отмечено существенного подавления каллусогенеза на средах с добавлением ионов Pb^{2+} , как и роста каллусов. При этом рост каллусов редиса на среде с добавлением 10 мкМ Pb^{2+} незначительно отличался от контроля. Угнетение роста отмечено только при самой высокой дозе металла в среде 1 мМ, но в то же время каллусы редиса имели больший размер по сравнению с каллусами, выращенными на средах с добавлением ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} .

Ионы цинка оказали весьма негативное действие на каллусогенез и рост каллусов огурца, вызывая отмирание клеток при высокой концентрации ионов, а в остальных концентрациях наблюдался лишь очень незначительный рост культуры клеток. Однако на каллусы редиса ионы Zn^{2+} оказали меньшее ингибирующее воздействие по сравнению с другими использованными ТМ. Каллусогенез редиса на средах с добавлением ионов Zn^{2+} проходил немного медленнее по сравнению с контролем, но заметного замедления роста каллусов отмечено не было (при всех использованных концентрациях).

На основании этого можно сделать заключение, что ТМ в низких концентрациях (очевидно, выступая в качестве микроэлементов) стимулируют образование и рост каллусов, тогда как в высоких сильно угнетают каллусогенез и рост. По негативному действию ТМ на каллусогенез и рост каллусов огурца их можно расположить в следующем порядке, начиная с самого токсичного: $\text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$. В то же время для редиса этот ряд выглядел несколько иначе: $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$.

Скорость генерации супероксидного анион-радикала в каллусах овощных культур

На каллусных культурах огурца и редиса гипокотильного происхождения определяли эффекты длительного выращивания в присутствии ТМ в среде на генерацию одной из потенциально опасных активированных форм кислорода – супероксидного анион-радикала ($\text{O}_2^{\bullet-}$).

В каллусах огурца выявлена четкая прямая зависимость между концентрацией ионов цинка в среде и скоростью генерации $\text{O}_2^{\bullet-}$ (табл. 1). Это свидетельствует о неблагоприятном воздействии на каллусную культуру ионов цинка, вызывающих усиление генерации $\text{O}_2^{\bullet-}$ (и, следовательно, возникновение окислительного стресса) [7].

В то же время выявлено, что остальные ионы ТМ не оказали выраженного активирующего действия на генерацию супероксида в каллусной культуре огурца. Так, при внесении в среду ионов никеля скорость генерации $\text{O}_2^{\bullet-}$ была ниже контроля, и наименьшее значение (меньше контроля в 2 раза) наблюдалось при концентрации 1 мМ (см. табл. 1). Скорость генерации супероксидного анион-радикала в каллусах огурца, длительно выращиваемых на среде МС с добавлением ионов Cu^{2+} , была ниже контроля в 1,5–3 раза. Значе-

ния генерации $O_2^{\bullet-}$ в каллусах огурца на среде с внесением ионов Pb^{2+} находились на уровне контроля при низких концентрациях, но снижались в 2 раза относительно контроля при самой высокой концентрации 1 мМ. Можно предположить, что ионы Ni^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} не индуцировали окислительный стресс в каллусной культуре огурца.

Таблица 1

Скорость генерации $O_2^{\bullet-}$ в 4-недельных каллусах огурца при действии различных концентраций ТМ, % к водному контролю

Ионы ТМ	Концентрация ионов ТМ		
	10 мкМ	0,1 мМ	1 мМ
Ni^{2+}	$81,3 \pm 2,3$	$91,5 \pm 4,6$	$52,9 \pm 0,2$
Zn^{2+}	$115,4 \pm 1,7$	$134,9 \pm 3,7$	$169,7 \pm 2,8$
Cu^{2+}	$53,0 \pm 2,3$	$61,4 \pm 1,1$	$36,1 \pm 0,1$
Pb^{2+}	$99,4 \pm 3,1$	$93,0 \pm 1,6$	$64,3 \pm 1,2$

Таким образом, длительное выращивание каллусов огурца на средах с избытком ТМ в большинстве вариантов не индуцировало повышения генерации $O_2^{\bullet-}$ (за исключением ионов Zn^{2+}). Возможно, развивающаяся в условиях хронического действия ТМ культура клеток адаптируется к ТМ либо за счет селекционных процессов, либо путем биохимической адаптации [10, 11].

Аналогичные определения, проведенные на каллусных культурах редиса, дали совершенно иные результаты (табл. 2). Так, наибольшее увеличение (относительно контроля) скорости генерации $O_2^{\bullet-}$ было обнаружено в каллусных линиях редиса, выращенных на средах с добавлением ионов Pb^{2+} , максимально (в 1,5 раза) – при самой малой дозе свинца в среде. На средах с добавлением ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} генерация $O_2^{\bullet-}$ была самой высокой при минимальной концентрации ионов (10 мкМ). Парадоксально, что увеличение концентраций ТМ в среде не индуцировало усиления генерации супероксида в каллусах редиса. А при внесении в среду ионов цинка реакция была полностью аномальной, поскольку при всех использованных концентрациях уровни $O_2^{\bullet-}$ были ниже контроля.

Таблица 2

Скорость генерации $O_2^{\bullet-}$ в 4-недельных каллусах редиса при действии различных концентраций ТМ, % к водному контролю

Ионы ТМ	Концентрация ионов ТМ		
	10 мкМ	0,1 мМ	1 мМ
Ni^{2+}	$124,8 \pm 0,6$	$93,9 \pm 0,1$	$107,9 \pm 0,4$
Zn^{2+}	$60,3 \pm 0,3$	$53,8 \pm 0,3$	$45,0 \pm 0,1$
Cu^{2+}	$132,9 \pm 0,1$	$88,4 \pm 0,2$	$123,0 \pm 0,1$
Pb^{2+}	$148,0 \pm 0,1$	$127,9 \pm 0,2$	$133,8 \pm 0,1$

Таким образом, несмотря на явно выраженное токсическое проявление ТМ на каллусогенез и рост каллусных культур огурца и редиса, отсутствие сильного окислительного стресса (судя по генерации супероксидного анион-радикала) в большинстве каллусов, длительно выращиваемых на различных

концентрациях ТМ, указывает на высокую вероятность акклимации клеточной популяции к токсическому действию ТМ. Это является подтверждением потенциальной возможности направленного повышения металлоустойчивости овощных культур посредством клеточной селекции.

Заключение

1. ТМ в низких концентрациях стимулировали образование и рост каллусов, тогда как в высоких сильно угнетали каллусогенез и рост. По токсическому действию ТМ на каллусогенез и рост каллусов можно расположить их в следующем порядке: $\text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$ (огурец), $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ (редис).

2. В каллусах огурца выявлено возникновение окислительного стресса при действии Zn^{2+} , причем между концентрацией ионов цинка в среде и скоростью генерации $\text{O}_2^{\bullet-}$ обнаружена прямая зависимость. В каллусах редиса, напротив, проявления окислительного стресса выявлены при действии ионов Pb^{2+} , а также самых малых или высоких концентраций Cu^{2+} и Ni^{2+} .

3. Длительное выращивание каллусов овощных культур на некоторых вариантах сред с внесением избыточных количеств ТМ не вызывало усиления генерации $\text{O}_2^{\bullet-}$, что может свидетельствовать о процессах адаптации клеток к ТМ.

Список литературы

1. Гладков Е. А. Биотехнологические методы получения растений, устойчивых к тяжелым металлам. 1. Сравнительная оценка токсичности тяжелых металлов для каллусных клеток и целых растений // Биотехнология. 2006. № 3. С. 79–82.
2. Гладков Е. А. Биотехнологические методы получения растений, устойчивых к тяжелым металлам. 2. Получение растений, толерантных к ионам кадмия и свинца // Биотехнология. 2006. № 4. С. 87–92.
3. Fornazier R. K., Ferreira R. R., Pereira G. J. [et al.]. Cadmium stress in sugar cane callus cultures: Effect of antioxidant enzymes // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2002. Vol. 71, № 2. P. 125–131.
4. Lukatkin A. S., Michailova I. D., Teixeira da Silva J. A. Prooxidative and antioxidative properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) callus *in vitro* and young *in vivo* plantlets in response to copper ions // Folia Horticulturae. 2013. Vol. 25, № 2. P. 141–151.
5. Lukatkin A., Egorova I., Michailova I. [et al.]. Effect of copper on pro- and antioxidative reactions in radish (*Raphanus sativus* L.) *in vitro* and *in vivo* // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2014. Vol. 28, № 1. P. 80–86.
6. Raeymaekers T., Potters G., Asard P. [et al.]. Copper-mediated oxidative burst in *Nicotiana tabacum* L. cv. Bright Yellow 2 cell suspension cultures // Protoplasma. 2003. Vol. 221, № 12. P. 93–100.
7. Лукаткин А. С. Вклад окислительного стресса в развитие холодового повреждения в листьях теплолюбивых растений. 1. Образование активированных форм кислорода при охлаждении растений // Физиология растений. 2002. Т. 49, № 5. С. 697–702.
8. Wiszniewska A., Muszyńska E., Kołton A. [et al.]. *In vitro* acclimation to prolonged metallic stress is associated with modulation of antioxidant responses in a woody shrub *Daphne jasminea* // Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC). 2019. Vol. 139. P. 339–357.
9. Zhu Y., Chen Y., Zhang X. [et al.]. Copper stress-induced changes in biomass accumulation, antioxidant activity and flavonoid contents in *Belamcanda chinensis* calli // Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC). 2020. Vol. 142. P. 299–311.

10. Huang G., Jin Y., Zheng J. [et al.]. Accumulation and distribution of copper in castor bean (*Ricinus communis* L.) callus cultures: *in vitro* // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2017. Vol. 128, № 1. P 177–186.
11. Cipriano R., Martins J. P. R., Conde L. T. [et al.]. Anatomical, physiological, and biochemical modulations of silicon in *Aechmea blanchetiana* (Bromeliaceae) cultivated *in vitro* in response to cadmium // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2021. Vol. 147. P. 271–285.

References

1. Gladkov E.A. Biotechnological methods for obtaining plants resistant to heavy metals. 1. Comparative assessment of toxicity of heavy metals for callus cells and whole plants. *Biotehnologiya = Biotechnology*. 2006;(3):79–82. (In Russ.)
2. Gladkov E.A. Biotechnological methods for obtaining plants resistant to heavy metals. 2. Production of plants tolerant to cadmium and lead ions. *Biotehnologiya = Biotechnology*. 2006;(4):87–92. (In Russ.)
3. Fornazier R.K., Ferreira R.R., Pereira G.J. [et al.]. Cadmium stress in sugar cane callus cultures: Effect of antioxidant enzymes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2002;71(2):125–131.
4. Lukatkin A.S., Michailova I.D., Teixeira da Silva J.A. Prooxidative and antioxidative properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) callus *in vitro* and young *in vivo* plantlets in response to copper ions. *Folia Horticulturae*. 2013;25(2):141–151.
5. Lukatkin A., Egorova I., Michailova I. [et al.]. Effect of copper on pro- and atioxidative reactions in radish (*Raphanus sativus* L.) *in vitro* and *in vivo*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2014;28(1):80–86.
6. Raeymaekers T., Potters G., Asard P. [et al.]. Copper-mediated oxidative burst in *Nicotiana tabacum* L. cv. Bright Yellow 2 cell suspension cultures. *Protoplasma*. 2003;221(12):93–100.
7. Lukatkin A.S. The contribution of oxidative stress to the development of cold damage in the leaves of thermophil plants. 1. Formation of activated oxygen species during plant cooling. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 2002;49(5):697–702. (In Russ.)
8. Wiszniewska A., Muszyńska E., Kołton A. [et al.]. *In vitro* acclimation to prolonged metallic stress is associated with modulation of antioxidant responses in a woody shrub *Daphne jasmine*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2019;139:339–357.
9. Zhu Y., Chen Y., Zhang X. [et al.]. Copper stress-induced changes in biomass accumulation, antioxidant activity and flavonoid contents in *Belamcanda chinensis* calli. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2020;142:299–311.
10. Huang G., Jin Y., Zheng J. [et al.]. Accumulation and distribution of copper in castor bean (*Ricinus communis* L.) callus cultures: *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2017;128(1):177–186.
11. Cipriano R., Martins J.P.R., Conde L.T. [et al.]. Anatomical, physiological, and biochemical modulations of silicon in *Aechmea blanchetiana* (Bromeliaceae) cultivated *in vitro* in response to cadmium. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* (PCTOC). 2021;147:271–285.

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Дмитриевна Михайлова
технолог, АО «Биохимик»,
(Россия, г. Саранск, ул. Васенко, 15А),

Irina D. Mikhaylova
Production engineer,
Joint-stock company “Biokhimik”
(15A Vasenko street, Saransk, Russia)

E-mail: irinamihajlova113@gmail.com

Александр Степанович Лукаткин

доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой ботаники,
физиологии и экологии растений,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевистская, 68)

E-mail: aslukatkin@yandex.ru

Aleksandr S. Lukatkin

Doctor of biological sciences, professor,
head of the sub-department of botany,
physiology and ecology of plants,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 22.06.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 06.07.2022

Принята к публикации / Accepted 30.07.2022