



УДК 58.02+574.24+574.64
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.40.54>

Комбинированное действие фенольных соединений и меди (II) на *Elodea canadensis*

С. Э. Сергиенко^{1,2}, В. О. Суховнина³, Г. О. Жданова¹, М. Н. Саксонов¹,
А. Д. Стом¹, Т. Энхдул⁴, Н. Ф. Кашина², Б. Н. Огарков¹, Д. И. Стом^{1,2,3*}

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

³Байкальский музей СО РАН, пос. Листвянка, Россия

⁴Монгольский государственный университет, г. Улан-Батор, Монголия

Аннотация. Исследовано действие ионов Cu^{2+} и двухатомных фенолов – гидрохинона и резорцина – на выход электролитов из побегов *Elodea canadensis*. Параметр фиксировали по изменению электропроводности среды, в которую был помещен тест-объект. Выполнена сравнительная оценка степени индивидуального и комбинированного воздействия меди и двухатомных фенолов на тест-объект при разных концентрациях токсикантов, определены векторы их взаимного влияния при комбинированном действии.

Ключевые слова: медь, измерение электропроводности, биотестирование, *Elodea canadensis*, гидрохинон, резорцин, двухатомные фенолы, комбинированное действие.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-54-44012 Монг_а. В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования «Научно-экспедиционный центр “Байкал”» (<https://ckprf.ru/catalog/ckpr/3213559/>).

Для цитирования: Комбинированное действие фенольных соединений и меди (II) на *Elodea canadensis* / С. Э. Сергиенко, В. О. Суховнина, Г. О. Жданова, М. Н. Саксонов, А. Д. Стом, Т. Энхдул, Н. Ф. Кашина, Б. Н. Огарков, Д. И. Стом // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2022. Т. 40. С. 54–65. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.40.54>

Research article

Combined Effect of Phenolic Compounds and Copper on *Elodea canadensis*

S. E. Sergienko^{1,2}, V. O. Sukhovnina³, G. O. Zhdanova¹, M. N. Saksonov¹,
A. D. Stom¹, T. Enkhdul⁴, N. F. Kashina², B. N. Ogarkov¹, D. I. Stom^{1,2,3*}

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

³Baikal Museum SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

⁴National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

© Сергиенко С. Э., Суховнина В. О., Жданова Г. О., Саксонов М. Н., Стом А. Д., Энхдул Т.,
Кашина Н. Ф., Огарков Б. Н., Стом Д. И., 2022

*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. The combined effect of Cu^{2+} ions and dihydric phenols, hydroquinone and resorcinol, on the yield of electrolytes from shoots of *Elodea canadensis* was studied. The individual effects of these groups of toxicants on aquatic plants have been fairly well studied. However, their combined action remains a poorly studied issue. This led to increased interest in this topic and the relevance of the research. The test response of *E. canadensis* during the biotesting of polyphenols, copper, and their mixtures was the release of electrolytes from shoots. This parameter was recorded by the change in the electrical conductivity of the water in which the plant pretreated with the toxicant was placed. The toxicity of solutions of copper, polyphenols, and “copper+polyphenol” mixtures was evaluated in acute experiments: the contact time of *E. canadensis* shoots with the toxicant was 30 min. The experiments showed that copper (II) caused an increase in the release of electrolytes from the shoots of *E. canadensis* compared to the control (plants not exposed to the toxicant) in the concentration range from 0.001 to 0.0001 N. Thus, the electrical conductivity of a medium containing elodea preliminarily treated with copper (II) at a concentration of 0.0001 N increased to 35 μS after 60 min of exposure. At a content of 0.001 to 0.01 N, the index increased to 62-79 μS . At the same time, in the control, this indicator fluctuated at the level of 2.5-5.5 μS throughout the experiment. Hydroquinone caused a significant increase in the yield of electrolytes from the shoots of *E. canadensis* at a content of $5 \cdot 10^{-2}$ M. In this case, the electrical conductivity of the medium in which the elodea treated with polyphenol was placed was 2.5 times higher than in the control (i.e. plant not exposed to toxicants). Resorcinol had a similar effect on *E. canadensis* at a content of $1 \cdot 10^{-1}$ M) observed a decrease in copper toxicity under the influence of polyphenols. When biotesting mixtures of copper (II) (0.001 N, 0.0001 N) with the studied polyphenols (hydroquinone $5 \cdot 10^{-2}$ M, resorcinol $1 \cdot 10^{-1}$ M), a decrease in the toxicity of copper under the influence of polyphenols was observed. The considered method for assessing the toxicity of substances is suitable not only for assessing the individual effects of various pollutants, but also for identifying the combined effects of various compounds. At the same time, the technique is characterized by ease of implementation and high speed of obtaining a response (about 2 hours).

Keywords: copper, conductivity measurement, biotesting, *Elodea canadensis*, hydroquinone, resorcinol, diatomic phenols, combined effect.

For citation: Sergienko S.E., Sukhovnina V.O., Zhdanova G.O., Saksonov M.N., Stom A.D., Enkhdul T., Kashina N.F., Ogarkov B.N., Stom D.I. Combined Effect of Phenolic Compounds and Copper on *Elodea canadensis*. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2022, vol. 40, pp. 54-65. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.40.54> (in Russian)

Введение

При определённых условиях в зависимости от источника загрязнения в качестве сопутствующих фенолам загрязнителей могут выступать тяжёлые металлы. При повышении концентраций обе группы поллютантов обнаруживают токсичность [Ambika, Mohnish, Kumar, 2016; Oxidative Stress ... , 2017].

Имеется множество публикаций о биологических эффектах отдельных фенольных соединений. Однако действие на растения высоких концентраций фенолов совместно с тяжёлыми металлами, даже со столь метаболически важным, как медь, изучено недостаточно хорошо.

Целью настоящей работы явилось исследование токсичности меди, двухатомных фенолов (резорцин, гидрохинон) и их смесей по отношению к *Elodea canadensis*.

Материалы и методы

Тест-объектом в исследовании являлась элодея канадская *Elodea canadensis* Michx. (1803) – цветковое водное растение, обладающее мощнейшим инвазионным потенциалом и населяющее ныне многие водоёмы мира [Чепинога, Дементьева, Лиштва, 2013; Голованов, Абрамова, Мулдашев,

2016]. Растения отбирали в прибрежье русла р. Ангары в пределах центрального района г. Иркутска (о. Юность). В лабораторных условиях элодею культивировали в аквариумах с отстоянной водопроводной водой при температуре 18 °С и освещённости 850–950 люкс. Аэрацию воды осуществляли с помощью микрокомпрессоров.

Тест-откликом *E. canadensis* в экспериментах являлся выход электролитов из побегов. Этот параметр фиксировали по изменению электропроводности воды, в которую было помещено предварительно обработанное токсикантом растение. Обработку побегов токсикантом проводили следующим образом. Побег элодеи сырой массой 1 г вносили в 50 мл испытуемого раствора токсиканта и выдерживали в течение 30 мин. После этого растение вынимали из исследуемого раствора и промывали дистиллированной водой в проточном режиме. Обработанные таким образом побеги помещали в 50 мл дистиллированной воды и в течение 1 ч измеряли её электропроводность при помощи кондуктометра «Эксперт-002-2-6-п» («Эконикс-Эксперт», Россия). Повышение показателя свидетельствовало о выходе ионов из клеток растения при их повреждении токсикантом [Юркова, Эстрела-Льопис, 2003; Stress-induced electrolyte ... , 2014; Murphy, Taiz, 1997].

Тестируемыми токсикантами в эксперименте являлись медь (II), двухатомные фенолы резорцин и гидрохинон, а также их смеси. Полифенолы перед внесением очищали методом возгонки. Концентрация резорцина в экспериментах составляла $5 \cdot 10^{-2}$ и $1 \cdot 10^{-1}$ М, гидрохинона – $1 \cdot 10^{-2}$ и $5 \cdot 10^{-2}$ М. Медь использована в виде химически чистого сульфата меди (II), концентрации меди в опытах (в пересчёте на ион Cu^{2+}) составляли 0,0001, 0,001 и 0,01 н.

Исследования проводили в пяти независимых опытах по три повторности в каждом. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $p \geq 0,95$. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета Statistica и процессора Excel из пакета MS Office 2016.

Результаты и обсуждение

Исследование действия токсикантов на выход электролитов из побегов E. canadensis. Медь (II) в исследуемом диапазоне концентраций (от 0,001 до 0,0001 н) вызывала выход электролитов из побегов *E. canadensis*. Так, электропроводность воды, содержащей элодею, предварительно обработанную сульфатом меди в концентрации 10^{-4} н, за 60 мин экспонирования повышалась до 35 мкСм, при содержании от 0,001 до 0,01 н – до 62–79 мкСм. Все эти значения превышали электропроводность контрольных образцов элодеи, не подверженных воздействию токсикантов (в этом случае показатель колебался на уровне 2,5–5,5 мкСм на всём протяжении опыта) (рис. 1, а).

Повышение электропроводности среды в 2,5 раза относительно контроля после помещения в неё образцов элодеи наблюдали также после воздействия на растения гидрохинона в концентрации $5 \cdot 10^{-2}$ М (рис. 1, б) и резорцина в концентрации $1 \cdot 10^{-1}$ М (рис. 1, в).

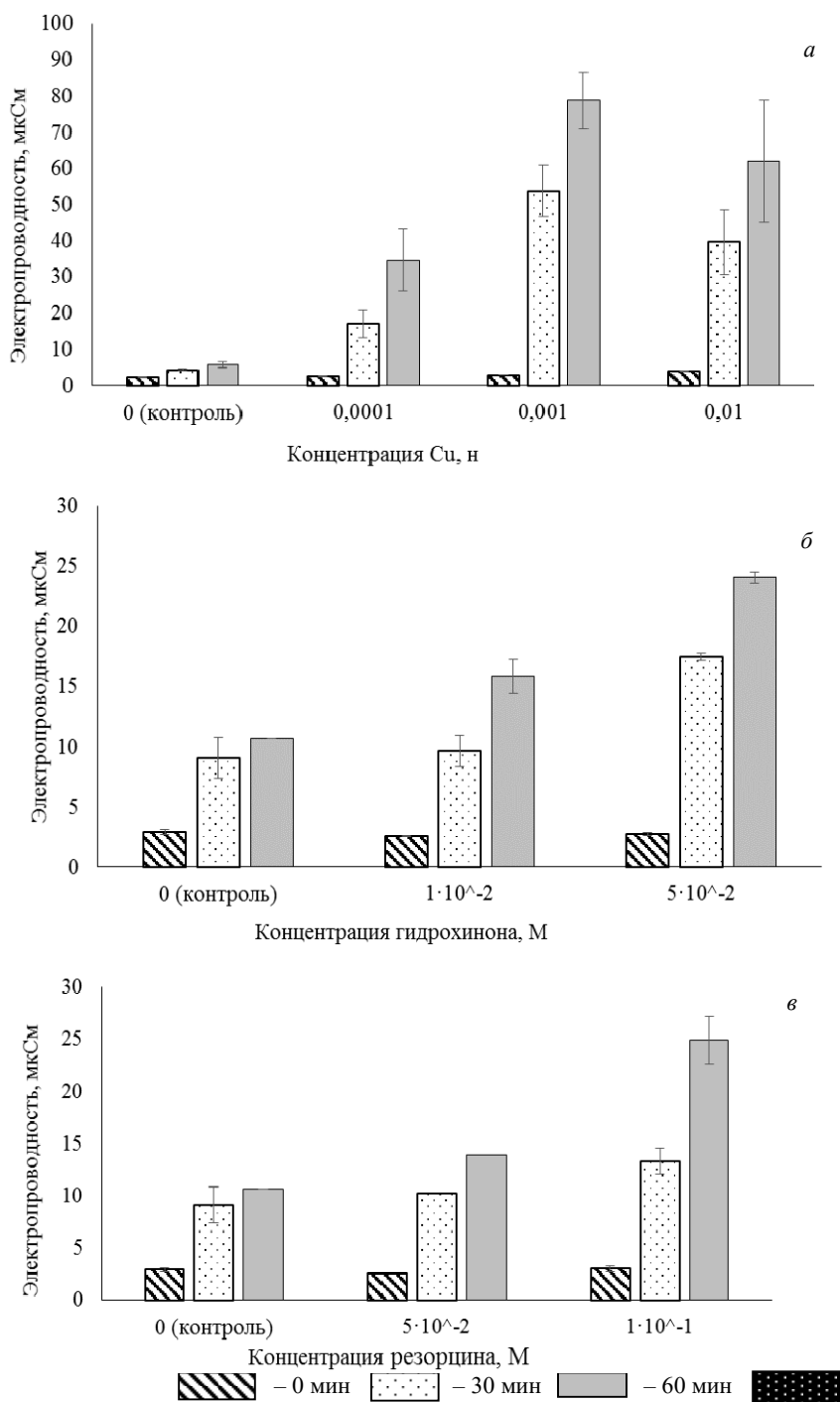


Рис. 1. Динамика выхода электролитов из побегов *E. canadensis* под влиянием различных токсикантов (длительность экспонирования в экспериментальной среде – 60 мин; время предварительного контакта растения с токсикантом – 30 мин): а – сульфат меди (II) (концентрация металла приведена в пересчёте на ион Cu^{2+}); б – гидрохинон; в – резорцин

Гидрохинон в концентрации $1 \cdot 10^{-2}$ М и резорцин в концентрации $5 \cdot 10^{-2}$ М значительного повышения выхода ионов из побегов элодеи не вызывали.

Исследование комбинированного действия токсикантов на выход электролитов из побегов *E. canadensis*. Токсичность меди по отношению к *E. canadensis* снижалась в присутствии двухатомных фенолов – гидрохинона и резорцина. Так, пара резорцин ($5 \cdot 10^{-2}$ М) + медь (0,001 н) вызывала менее значительный выход электролитов из клеток элодеи, чем при индивидуальном действии 0,001 н меди. Электропроводность воды, содержащей элодею, предварительно выдержанную в растворе меди, за 60 мин повышалась до 47 мкСм, в то время как после обработки растения смесью металла и фенола в указанных концентрациях показатель возрастал только до 17,3 мкСм (рис. 2, а). Схожую картину наблюдали и в опытах с $1 \cdot 10^{-1}$ М резорцина (рис. 2, б).

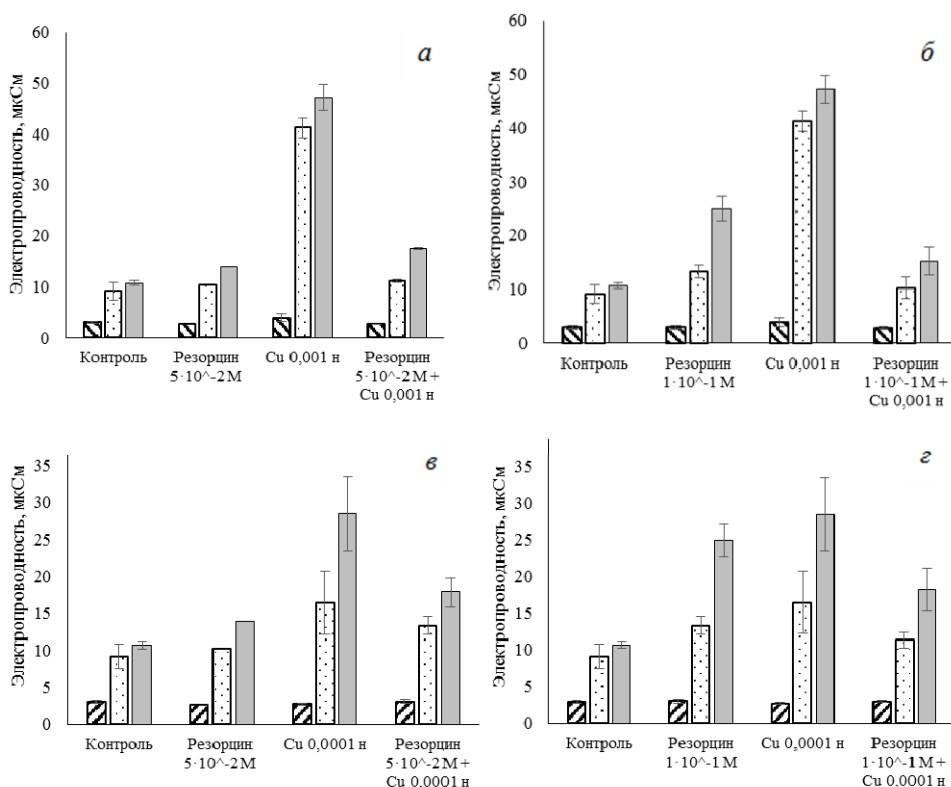


Рис. 2. Динамика выхода электролитов из побегов *E. canadensis* под совместным влиянием меди и резорцина в различных концентрациях (длительность экспонирования в экспериментальной среде – 60 мин; время предварительного контакта растения с токсикантом – 30 мин): а – ионы меди ($1 \cdot 10^{-3}$ н) и резорцина ($5 \cdot 10^{-2}$ М); б – ионы меди ($1 \cdot 10^{-3}$ н) и резорцина ($1 \cdot 10^{-1}$ М); в – ионы меди ($1 \cdot 10^{-4}$ н) и резорцина ($5 \cdot 10^{-2}$ М); г – ионы меди ($1 \cdot 10^{-4}$ н) и резорцина ($1 \cdot 10^{-1}$ М)

Подобный, но менее выраженный эффект наблюдали и при более низкой концентрации меди ($0,0001$ н). Это вполне ожидаемо, учитывая, что отклик *E. canadensis* на более низкое содержание металла (по сравнению с предыдущим опытом) менее значителен. В этом случае электропроводность воды, содержащей элодею, обработанную медью ($0,0001$ н) повышалась до $28,5$ мкСм (в то время как после воздействия $0,001$ н Cu – до 47 мкСм (рис. 2, а, б), а после обработки смесями меди и резорцина выход электролитов был ещё ниже: Cu ($0,0001$ н) + резорцин $5 \cdot 10^{-2}$ М – до $17,9$ мкСм (рис. 2, в); Cu ($0,0001$ н) + резорцин $1 \cdot 10^{-1}$ М – до $18,2$ мкСм (рис. 2, г).

Снижение токсичности меди в присутствии гидрохинона было менее значительным, чем при добавлении резорцина. Так, электропроводность воды в присутствии элодеи, предварительно выдержанной в растворе $0,001$ н меди за 60 мин, возрастала до 47 мкСм. Присутствие в растворе меди гидрохинона в концентрации $1 \cdot 10^{-2}$ М приводило к уменьшению исследуемого показателя до $44,5$ мкСм (рис. 3, а), а при $5 \cdot 10^{-2}$ М – до 32 мкСм (рис. 3, б).

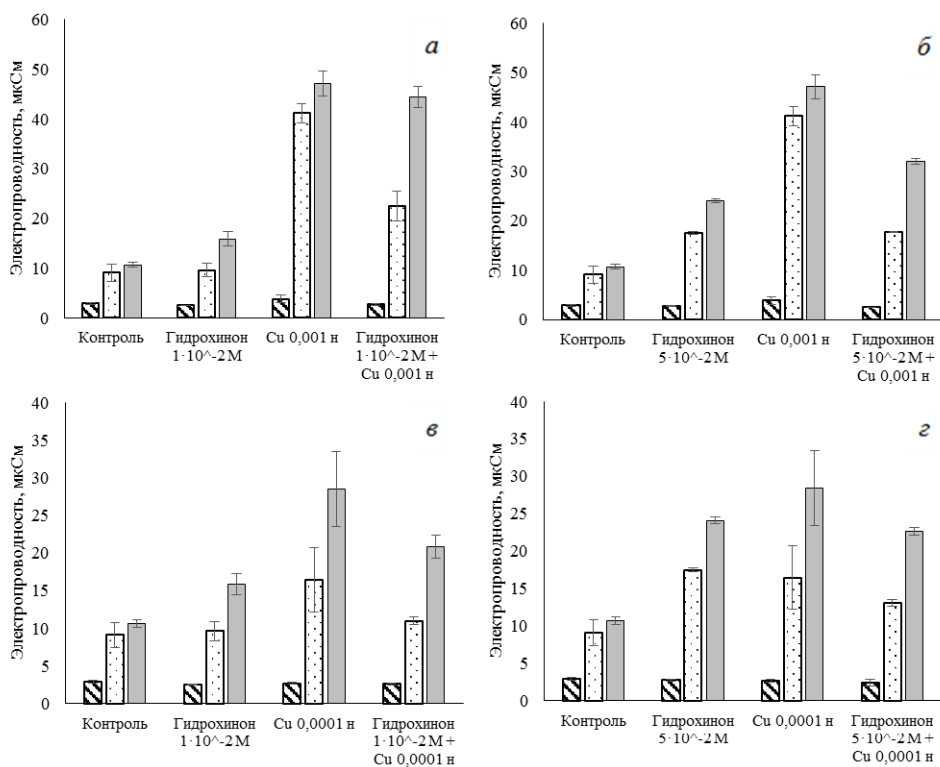


Рис. 3. Динамика выхода электролитов из побегов *E. canadensis* под совместным влиянием меди и гидрохинона в различных концентрациях (длительность экспонирования в экспериментальной среде – 60 мин; время предварительного контакта растения с токсикантом – 30 мин): а – ионы меди ($1 \cdot 10^{-3}$ н) и гидрохинона ($5 \cdot 10^{-2}$ М); б – ионы меди ($1 \cdot 10^{-3}$ н) и гидрохинона ($1 \cdot 10^{-1}$ М); в – ионы меди ($1 \cdot 10^{-4}$ н) и гидрохинона ($5 \cdot 10^{-2}$ М); г – ионы меди ($1 \cdot 10^{-4}$ н) и гидрохинона ($1 \cdot 10^{-1}$ М)

В экспериментах с $1 \cdot 10^{-4}$ н Cu^{2+} и гидрохиноном тенденция была схожей – наблюдали слабый детоксицирующий эффект полифенола по отношению к меди (рис. 3, в, з).

Металлы с переменной валентностью, в частности катионы меди, способны вступать в окислительно-восстановительные реакции с фенольными соединениями [Reactivity of the ... , 2017; Effect of interaction ... , 2011]. В результате этих реакций могут образовываться хиноны и активные формы кислорода (АФК). Они играют важную роль в повреждении белков, липидов, полисахаридов, нарушении фотосинтеза [Similar stress responses ... , 2003; Yruela, 2005; Azooz, Abou-Elhamd, Al-Fredan, 2012]. Сообщалось о способности катионов меди при определённых условиях катализировать окисление фенолов и о том, что в конце концов это приводит к снижению токсичности последних [Geel, Stom, 2001; Oxidation of hydroquinone ... , 2006; Copper-catalyzed hydroquinone ... , 2013; Controlling the catalytic ... , 2014]. Однако в наших краткосрочных экспериментах детоксикация меди исследуемыми фенольными соединениями, вероятнее всего, связана с их способностью к комплексообразованию с некоторыми металлами. Реакции этих соединений между собой довольно хорошо известны [Reactivity of the ... , 2017; Borowska, Brzoska, Tomczyk, 2018]. В частности, А. Ёсс с соавторами этот путь проиллюстрировали с помощью потенциометрии, ЭПР, УФ-спектроскопии поглощения и молекулярного моделирования [Elucidation of phenol-Cu ... , 1999]. Более того, предполагают, что выделение фенолов растениями является одним из защитных механизмов против повышенных концентраций меди в среде. Так, например, К. Юнг с соавторами показали, что при выращивании люпина в условиях повышенного содержания меди (20 мкМ) концентрация полифенольных соединений (особенно изофлавоноидов генистеина и генистеин-(малонил)-глюкозида) в корнях была значительно выше по сравнению с контрольными растениями. Результаты исследования адсорбционных процессов, полученные с использованием вольтамперометрии, продемонстрировали связывание ионов Cu^{2+} этими фенольными соединениями. Всё это позволило авторам предполагать, что комплексообразование ионов Cu^{2+} в ризосфере и в апоплазме корней с фенольными соединениями могло бы уменьшить Cu -опосредованную токсичность [Release of phenols ... , 2003]. Повышение выхода фенолов растениями в условиях повышенного содержания меди зафиксировано и другими авторами на других растениях [Sgherri, Cosi, Navari-Izzo, 2003; Variability of the phenolic ... , 2013].

О способности фенолов к комплексообразованию с медью сообщали не только исследователи, изучающие растительные организмы. Так, К. Ким с соавторами [Kim, Lee, Kim, 2006] изучали изменение токсичности для *Daphnia magna* производных меди и фенола при их одновременном присутствии в смесях. Титриметрическим методом авторы показали, что фенол играет важную роль в значительном снижении концентрации Cu^{2+} из-за его комплексообразования с Cu^{2+} с последующим снижением токсичности водных смесей, содержащих эти токсиканты.

В пользу комплексообразования в условиях наших опытов свидетельствует и тот факт, что при индивидуальном действии токсичность меди значительно превышает токсичность гидрохинона и резорцина, т. е. в присутствии фенолов наблюдается снижение токсичности меди, а не наоборот.

Заключение

В экспериментах по оценке комбинированного действия на макрофиты двухатомных фенолов и меди с применением тест-функции, основанной на оценке выхода электролитов из побегов *Elodea canadensis* (по изменению электропроводности воды, в которую было помещено предварительно обработанное токсикантом растение), в острых опытах обнаружено снижение токсичности меди (II) под действием определенных концентраций полифенолов резорцина и гидрохинона. Продемонстрировано, что токсичность растворов меди выше, чем её токсичность в смеси с гидрохиноном или резорцином. Снижение токсичности меди в присутствии гидрохинона оказалось менее значительным, чем в смеси с резорцином.

Следует отметить, что применённая в работе тест-реакция макрофита позволяет получать достоверный ответ о токсичности испытуемых соединений в довольно короткий срок – в течение двух часов. При этом показана перспективность использования такого тест-отклика как для оценки индивидуальных эффектов поллютантов, так и для изучения комбинированного действия веществ на растительные тест-объекты.

Список литературы

Голованов Я. М., Абрамова Л. М., Мулдашев А. А. Натурализация инвазионного вида *Elodea canadensis* Michx. в водоёмах республики Башкортостан // Российский журнал биологических инвазий. 2016. № 2. С. 7–21.

Чепинога В. В., Дементьева М. К., Лиштва А. В. Флористические находки в бассейне верхнего течения реки Лены (Иркутская область) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2013. Т. 6, № 1. С. 102–109.

Юркова И. Н., Эстрела-Льопис В. Р. Кондуктометрический альготест качества водной среды // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2003. Т. 16, № 1 (55). С. 113–118.

Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview // Int. J. Appl. Innov. Eng. Manag. (IAIEM). 2016. Vol. 5, Is. 3. P. 56–66. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27583.87204>

Azooz M. M., Abou-Elhamd M. F., Al-Fredan M. A. Biphasic effect of copper on growth, proline, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* cv. Hasaawi) at early growing stage // Aust. J. Crop Sci. 2012. Vol. 6, N 4. P. 688–694.

Borowska S., Brzoska M. M., Tomczyk M. Complexation of Bioelements and Toxic Metals by Polyphenolic Compounds – Implications for Health // Curr. Drug Targets. 2018. Vol. 19, N 14. P. 1612–1638. <https://doi.org/10.2174/1389450119666180403101555>

Controlling the Catalytic Aerobic Oxidation of Phenols / K. V. N. Esguerra, Y. Fall, L. Petitjean, J.-Ph. Lumb // J. Am. Chem. Soc. 2014. Vol. 136, N 21. P. 7662–7668. <https://doi.org/10.1021/ja501789x>

Copper-Catalyzed Hydroquinone Oxidation and Associated Redox Cycling of Copper under Conditions Typical of Natural Saline Waters / X. Yuan, A. N. Pham, Ch. J. Miller, T. D. Waite // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47, No. 15. P. 8355–8364. <https://doi.org/10.1021/es4014344>

Effect of interaction between phenolic compounds and copper ion on antioxidant and prooxidant activities / Y. Iwasaki, T. Hirasawa, Y. Maruyama, Y. Ishii, R. Ito, K. Saito, T. Umemura,

A. Nishikawa, H. Nakazawa // *Toxicology in Vitro*. 2011. Vol. 25, Is. 7. P. 1320–1327, <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2011.04.024>

Elucidation of phenol-Cu interaction mechanisms by potentiometry, ESR, UV absorption spectroscopy and molecular simulations / A. Oess, M. V. Cheshire, D. B. McPhail, S. Stoll, M. El. Alaïli, J.-C. Vedy // *Sci. Total Environ*. 1999. Vol. 228, Is. 1. P. 49–58. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00029-7)

Geel T. A., Stom D. I. Toxic action of organic compounds and heavy metals on *Epischura baicalensis* and *Daphnia magna* in the presence of fodder organisms // *Hydrobiol. J*. 2001. Vol. 37, Is. 4. P. 130–136. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v37.i4.120>

Kim K. T., Lee Y. G., Kim S. D. Combined toxicity of copper and phenol derivatives to *Daphnia magna*: Effect of complexation reaction // *Environment International*. 2006. Vol. 32, Is. 4. P. 487–492. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.11.002>

Murphy A., Taiz L. Correlation between potassium efflux and copper sensitivity in ten Arabidopsis ecotypes // *New Phytol*. 1997. Vol. 136. P. 211–222. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00738.x>

Oxidation of hydroquinone to p-benzoquinone catalyzed by Cu(II) supported on chitosan flakes / E. Guibal, T. Vincent, E. Touraud, S. Colombo, A. Ferguson // *J. Appl. Polym. Sci*. 2006. Vol. 100. P. 3034–3043. <https://doi.org/10.1002/app.23702>

Oxidative Stress and Heavy Metals in Plants / R. Fryzova, M. Pohanka, P. Martinkova, H. Cihlarova, M. Brtnicky, J. Hladky, J. Kynicky // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* / ed. P. de Voogt. Cham: Springer, 2017. Vol. 245. P. 129–156. https://doi.org/10.1007/398_2017_7

Reactivity of the copper(III)-hydroxide unit with phenols / D. Dhar, G. M. Yee, T. F. Markle, J. M. Mayer, W. B. Tolman // *Chem. Sci*. 2017. Vol. 8. P. 1075–1085. <https://doi.org/10.1039/C6SC03039D>

Release of phenols from *Lupinus albus* L. roots exposed to Cu and their possible role in Cu detoxification / C. Jung, V. Maeder, F. Funk, B. Frey, H. Sticher, E. Frossard // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 252. P. 301–312. <https://doi.org/10.1023/A:1024775803759>

Sgherri C., Cosi E., Navari-Izzo F. Phenols and antioxidative status of *Raphanus sativus* grown in copper excess // *Physiol. Plant*. 2003. Vol. 118. P. 21–28. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00068.x>

Similar Stress Responses are Elicited by Copper and Ultraviolet Radiation in the Aquatic Plant *Lemma gibba*: Implication of Reactive Oxygen Species as Common Signals / T. S. Babu, T. A. Akhtar, M. A. Lampi, S. Tripuranthakam, D. G. Dixon, B. M. Greenberg // *Plant Cell Physiol*. 2003. Vol. 44, Is. 12. P. 1320–1329. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg160>

Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment / V. Demidchik, D. Straltsova, S. S. Medvedev, G. A. Pozhvanov, A. Sokolik, V. Yurin // *J. Exp. Bot*. 2014. Vol. 65, Is. 5. P. 1259–1270. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru004>

Variability of the phenolic profile in the diatom *Phaeodactylum tricoratum* growing under copper and iron stress / M. Rico, A. López, J. M. Santana-Casiano, A. G. González, M. González-Dávila // *Limnol. Oceanogr*. 2013. Vol. 58, Is. 1. P. 144–152. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.1.0144>

Yruela I. Copper in plants // *Braz. J. Plant Physiol*. 2005. Vol. 17. P. 145–156. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>

References

Golovanov Ya.M., Abramova L.M., Muldashev A. A. Naturalizatsiya invazionnogo vida *Elodea canadensis* Michx. v vodoemakh respubliki Bashkortostan [Naturalization of the invasive species *Elodea canadensis* Michx. in water bodies of the Republic of Bashkortostan]. *Russ. J. Biol. Invas.*, 2016, no. 2, pp. 7–21. (in Russian)

Chepinoga V.V., Dementeva M.K., Lishtva A.V. Floristicheskie nakhodki v basseine verkhnego techeniya reki Leny (Irkutskaya oblast) [Floristic finds in the basin of the upper reaches of the Lena River (Irkutsk region)]. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 102–109. (in Russian)

Yurkova I.N., Estrela-Lopis V.R. Konduktometricheskii algotest kachestva vodnoi sredy [Conductometric algotest of the quality of the aquatic environment]. *Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*. [Scientific notes V.I. Vernadsky Crimean Fed. Univ. Biol. Chem.], 2003, vol. 16, no. 1 (55), pp. 113-118. (in Russian)

Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview. *Int. J. Appl. Innov. Eng. Manag.* (IJAIEEM), 2016, vol. 5, is. 3, pp. 56-66. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27583.87204>

Azooz M.M., Abou-Elhamd M.F., Al-Fredan M.A. Biphasic effect of copper on growth, proline, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* cv. Hasaawi) at early growing stage. *Aust. J. Crop Sci.*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 688-694.

Borowska S., Brzoska M.M., Tomczyk M. Complexation of Bioelements and Toxic Metals by Polyphenolic Compounds – Implications for Health. *Curr. Drug Targets*, 2018, vol. 19, no.14, pp. 1612-1638. <https://doi.org/10.2174/1389450119666180403101555>

Esguerra K.V.N., Fall Y., Petitjean L., Lumb J.-Ph. Controlling the Catalytic Aerobic Oxidation of Phenols. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, vol. 136, no. 21, pp. 7662-7668. <https://doi.org/10.1021/ja501789x>

Yuan X., Pham A.N., Miller Ch.J., Waite T.D. Copper-Catalyzed Hydroquinone Oxidation and Associated Redox Cycling of Copper under Conditions Typical of Natural Saline Waters. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, no. 15, pp. 8355-8364. <https://doi.org/10.1021/es4014344>

Iwasaki Y., Hirasawa T., Maruyama Y., Ishii Y., Ito R., Saito K., Umemura T., Nishikawa A., Nakazawa H. Effect of interaction of phenolic compounds and copper ion on antioxidant and pro-oxidant activities. *Toxicology in Vitro*, 2011, vol. 25, is. 7, pp. 1320-1327. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2011.04.024>

Oess A., Cheshire M.V., McPhail D.B., Stoll S., El Alaili M., Vedy J.-C. Elucidation of phenol-Cu interaction mechanisms by potentiometry, ESR, UV absorption spectroscopy and molecular simulations. *Sci. Total Environ.*, 1999, vol. 228, is. 1, pp. 49-58. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00029-7)

Geel T.A., Stom D.I. Toxic action of organic compounds and heavy metals on *Epischura baircalensis* and *Daphnia magna* in the presence of fodder organisms. *Hydrobiol. J.*, 2001, vol. 37, is. 4, pp. 130-136. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v37.i4.120>

Kim K.T., Lee Y.G., Kim S.D. Combined toxicity of copper and phenol derivatives to *Daphnia magna*: Effect of complexation reaction. *Environment International*, 2006, vol. 32, is. 4, pp. 487-492. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.11.002>

Murphy A., Taiz L. Correlation between potassium efflux and copper sensitivity in ten *Arabidopsis* ecotypes. *New Phytol.*, 1997, vol. 136, pp. 211-222. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00738.x>

Guibal E., Vincent T., Touraud E., Colombo S., Ferguson A. Oxidation of hydroquinone to p-benzoquinone catalyzed by Cu(II) supported on chitosan flakes. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2006, vol. 100, pp. 3034-3043. <https://doi.org/10.1002/app.23702>

Fryzova R., Pohanka M., Martinkova P., Cihlarova H., Brtnicky M., Hladky J., Kynicky J. Oxidative Stress and Heavy Metals in Plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. P. de Voogt (ed.), 2017, vol 245, pp. 129–156. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/398_2017_7

Dhar D., Yee G. M., Markle T.F., Mayer J.M., Tolman W.B. Reactivity of the copper(III)-hydroxide unit with phenols. *Chem. Sci.*, 2017, vol. 8, pp. 1075-1085. <https://doi.org/10.1039/C6SC03039D>

Jung C., Maeder V., Funk F., Frey B., Sticher H., Frossard E. Release of phenols from *Lupinus albus* L. roots exposed to Cu and their possible role in Cu detoxification. *Plant and Soil*, 2003, vol. 252, pp. 301-312. <https://doi.org/10.1023/A:1024775803759>

Sgherri C., Cosi E., Navari-Izzo F. Phenols and antioxidative status of *Raphanus sativus* grown in copper excess. *Physiol. Plant.*, 2003, vol. 118, pp. 21-28. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00068.x>

Babu T.S., Akhtar T.A., Lampi M.A., Tripuranthakam S., Dixon D.G., Greenberg B.M. Similar Stress Responses are Elicited by Copper and Ultraviolet Radiation in the Aquatic Plant *Lemna gibba*: Implication of Reactive Oxygen Species as Common Signals. *Plant Cell Physiol.*, 2003, vol. 44, is. 12, pp. 1320-1329. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg160>

Demidchik V., Straltsova D., Medvedev S.S., Pozhvanov G.A., Sokolik A., Yurin V. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *J. Exp. Bot.*, 2014, vol. 65, is. 5, pp. 1259-270. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru004>

Rico M., López A., Santana-Casiano J.M., González A.G., González-Dávila M. Variability of the phenolic profile in the diatom *Phaeodactylum tricornutum* growing under copper and iron stress. *Limnol. Oceanogr.*, 2013, vol. 58, is. 1, pp. 144-152. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.1.0144>

Yrueala I. Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 2005, vol. 17, pp. 145-156. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>

Сведения об авторах

Сергиенко Светлана Эдуардовна

лаборант-исследователь

Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

магистрант

Иркутский национальный исследовательский

технический университет

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова,

83

e-mail: amygdifford@gmail.com

Суховнина Виктория Олеговна

аспирант

Байкальский музей СО РАН

Россия, 664520, пос. Листвянка,

ул. Академическая, д. 1

e-mail: biosvo@mail.ru

Жданова Галина Олеговна

ведущий инженер

Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

e-mail: zhdanova86@yandex.ru

Саксонов Михаил Наумович

кандидат биологических наук

старший научный сотрудник

Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

e-mail: msaksonov@mail.ru

Стом Алина Дэвардовна

кандидат биологических наук,

ведущий инженер

Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

e-mail: apatania@yandex.ru

Information about the authors

Sergienko Svetlana Eduardovna

Research Assistant

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,

Russian Federation

Undergraduate

Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074,

Russian Federation

e-mail: amygdifford@gmail.com

Sukhovnina Victoria Olegovna

Postgraduate

Baikal Museum SB RAS

1, Academicheskaya st., Listvyanka settl.,

664520, Russian Federation

e-mail: biosvo@mail.ru

Zhdanova Galina Olegovna

Leading Engineer

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,

Russian Federation

e-mail: zhdanova86@yandex.ru

Saksonov Mikhail Naumovich

Candidate of Sciences (Biology),

Senior Research Scientist

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,

Russian Federation

e-mail: msaksonov@mail.ru

Stom Alina Devardovna

Candidate of Sciences (Biology),

Lead Engineer

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,

Russian Federation

e-mail: apatania@yandex.ru

Энхдул Туугу

кандидат наук, доцент
Монгольский государственный университет
Монголия, 210646, г. Улан-Батор,
ул. Университетская, д. 1
e-mail: enkhdul@seas.num.edu.mn

Enkhdul Tuuguu

Ph. D., Associate Professor
National University of Mongolia
1, University st., Ulaanbaatar, 210646,
Mongolia
e-mail: enkhdul@seas.num.edu.mn

Кашина Нина Федоровна

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова,
83
e-mail: officekashina@mail.ru

Kashina Nina Fedorovna

Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
e-mail: officekashina@mail.ru

Огарков Борис Никитович

доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой, заведующий
лабораторией
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: bornik@bk.ru

Ogarkov Boris Nikitovich

Doctor of Sciences (Biology), Professor,
Head of Department, Head of Laboratory
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: bornik@bk.ru

Стом Дэвард Иосифович

доктор биологических наук, профессор,
заведующий лабораторией
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
профессор
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83
главный научный сотрудник
Байкальский музей СО РАН
Россия, 664520, п. Листвянка,
ул. Академическая, д. 1
e-mail: stomd@mail.ru

Stom Devard Iosifovich

Doctor of Sciences (Biology),
Professor, Head of Laboratory
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
Professor
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
Principal Research Scientist
Baikal Museum SB RAS
1, Akademicheskaya st., Listvyanka settl.,
664520, Russian Federation
e-mail: stomd@mail.ru