

Д. А. Щукина, Г. Г. Борисова, М. Г. Малева

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ ТОЛЕРАНТНОСТИ АДВЕНТИВНОГО МАКРОФИТА *LEMNA GIBBA* L. К ДЕЙСТВИЮ ИОНОВ МЕДИ

D. A. Shchukina, G. G. Borisova, M. G. Maleva

TOLERANCE OF ADVENTIVE MACROPHYTE *LEMNA GIBBA* L. TO COPPER IONS: RANGE EVALUATION

Аннотация. В последние десятилетия активизировались процессы адвентизации флоры, что представляет угрозу биоразнообразию. Адвентивные виды растений осваивают новые территории, включая трансформированные, вытесняя аборигенные виды. В связи с этим актуальным является изучение пределов толерантности чужеродных видов к высоким техногенным нагрузкам, что позволит оценить перспективы распространения адвентивных растений. Целью исследования было выявление ответных реакций адвентивного макрофита *Lemna gibba* L. на действие ионов меди в градиенте концентраций от 0 до 10 мг/л. Фронды ряски инкубировали в модельных системах в течение 6 суток при естественном освещении. Выявлена высокая положительная корреляция между содержанием меди в растворе и растениях. При этом рост накопления металла носил экспоненциальный характер. Обнаружено проявление фитотоксических эффектов меди с увеличением концентрации $\geq 0,5$ мг/л, что выражалось в повышении содержания прооксидантов и депигментации фрондов за счет деградации фотосинтетических пигментов. При максимальной концентрации меди (10 мг/л) содержание хлорофиллов было ниже в 2,5 раза, а каротиноидов – в 11,5 раз по сравнению с контролем. Проведенное исследование позволило оценить пределы толерантности *L. gibba* к действию ионов меди и выявить физиолого-биохимические параметры, которые могут быть использованы в качестве биомаркеров токсичности.

Ключевые слова: адвентивная фракция флоры; тяжелые металлы; прооксидантные реакции; пигментный аппарат; биомаркеры токсичности.

Abstract. In recent decades, adventitization processes in flora have become more vigorous, which poses a threat to biodiversity. Adventive plant species occupy new territories, including transformed ones, and oust native species. In this regard, it is relevant to study the tolerance range of alien species to high technogenic loads since it can help assess the spread of adventive plants. The aim of the research was to study the response of the adventive macrophyte *Lemna gibba* L. to the copper ions action in a gradient from 0 to 10 mg/L. Duckweed fronds were incubated in model systems for six days under natural light conditions. A high positive correlation between copper content in the nutrient solution and plants was revealed. Moreover, the rise of metal accumulation was exponential. With an increase in copper concentration ≥ 0.5 mg/L, its phytotoxic effect manifested itself through the increased prooxidant content and the depigmentation of fronds due to the photosynthetic pigments degradation. At the maximum copper concentration (10 mg/L), the chlorophyll content was 2.5 times lower, and carotenoids, 11.5 times, as compared to the control sample. The study assessed *L. gibba* tolerance range to the copper ions action and identified physiological and biochemical parameters that can serve as toxicity biomarkers.

Key words: adventive flora fraction; heavy metals; prooxidant reactions; pigment apparatus; toxicity biomarkers.

Сведения об авторах: Щукина Дарья Алексеевна, ORCID: 0000-0003-1645-9054, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, postnikdaria@rambler.ru; Борисова Галина Григорьевна, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р геогр. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru; Малева Мария Георгиевна, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru.

About the authors: Shchukina Daria Alekseevna, ORCID: 0000-0003-1645-9054, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, postnikdaria@rambler.ru; Borisova Galina Grigoryevna, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Dr. habil., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru; Maleva Maria Georgievna, ORCID: 0000-0003-1686-6071, Ph.D., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru.

Введение

В настоящее время на общемировом уровне наблюдается активизация процессов адвентизации флоры, что является прямым следствием возрастающей антропогенной нагрузки на природные экосистемы. Адвентивные виды растений вытесняют виды местной флоры, становясь эдификаторами и доминантами растительных сообществ, чем представляют собой серьезную угрозу региональному биологическому разнообразию [1]. Во всех странах мира уделяется большое внимание изучению адвентивных видов, механизмов их внедрения и характера миграций. На сегодняшний день выполнен большой объем исследований процессов адвентизации флоры: проведена инвентаризация, дана подробная биоэкологическая характеристика, изучена динамика биологического разнообразия, выявлены закономерности распределения [6; 30]. Однако недостаточно изучены остаются эколого-физиологические механизмы адаптации, позволяющие чужеродным растениям внедряться в природные сообщества и успешно конкурировать с аборигенными видами.

Lemna gibba L. (ряска горбатая) – плавающий водный макрофит из семейства Lemnaceae, относится к числу активно расселяющихся представителей адвентивной фракции флоры и встречается почти на всех обитаемых континентах [20]. *L. gibba* характеризуется как агрессивный инвазивный вид, предпочитающий произрастать в эвтрофных водных экосистемах. До недавнего времени этот вид не имел широкого распространения в умеренных областях Северного полушария из-за климатических особенностей, в том числе и на территории России. Однако в зарубежной и отечественной литературе все чаще стали появляться сообщения о быстром распространении этого вида по территории Евразии. В России распространение вида с запада на восток пока ограничено Западной Сибирью (Курганская и Тюменская области, ХМАО–Югра) [2].

К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных изучению вариантов использования *L. gibba* для очистки сточных и рудничных вод от тяжелых металлов (ТМ) и других поллютантов [14; 23; 24; 28; 29; 31]. Большой интерес у исследователей вызывают аспекты, связанные с изучением механизмов устойчивости этого макрофита к действию меди [8; 10; 18; 25]. Медь характеризуется не только высоким уровнем токсичности среди других ТМ в ряду Ирвинга–Вильямса [16; 17; 19], но и тем, что является важным эссенциальным элементом, который необходим для роста и развития растений [12; 15; 22]. Однако, будучи редокс-активным металлом, медь может напрямую участвовать в генерации высокотоксичных активных форм кислорода (АФК) и вызывать окислительный стресс в клетках растений [18; 22; 23]. В большинстве случаев исследования направлены на оценку аккумулятивной способности *L. gibba* в отношении меди и возможностей использования этого вида для биоиндикационных и фиторемедиационных целей [11; 13; 24; 27]. Однако ответные физиолого-биохимические реакции этого адвентивного макрофита изучены недостаточно. Кроме того, в связи с ростом антропогенной нагрузки на водные экосистемы, все большую актуальность приобретает поиск доступных и эффективных биомаркеров токсичности, что позволит оперативно оценить степень воздействия и спрогнозировать состояние гидроценозов. Таким образом, данное исследование было направлено на оценку пределов толерантности *L. gibba* к действию меди и выявление репрезентативных физиолого-биохимических параметров, перспективных для использования в качестве биомаркеров токсичности.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования были растения *L. gibba*, отобранные в середине июля 2019 г. из естественной популяции, обитающей в пруду-отстойнике сточных вод Северского трубного завода (г. Полевской, Свердловская область). Данный водоем характеризуется высоким уровнем техногенного загрязнения, в том числе и повышенным содержанием меди, которое в среднем в 8 раз превышало предельно допустимую концентрацию для водных объектов рыбохозяйственного назначения [7].

Растения промывали проточной, а затем дистиллированной водой и инкубировали в цилиндрических сосудах объемом 3 л в течение 6 суток на 5%-ной питательной среде Хогланда–Арнона I (без микроэлементов). В опытные варианты добавляли сульфат меди в концентрации 0,1; 0,25; 0,5; 1; 5 и 10 мг/л (в расчете на ион). Контролем служили сосуды со средой без добавления меди. Растения инкубировали при естественном освещении (фотопериод 16:8) и температуре 24°C ± 2°C.

Визуальную оценку депигментации фрондов ряски и степени некротических изменений проводили по окончании срока инкубирования. Содержание меди в фрондах *L. gibba* определяли с

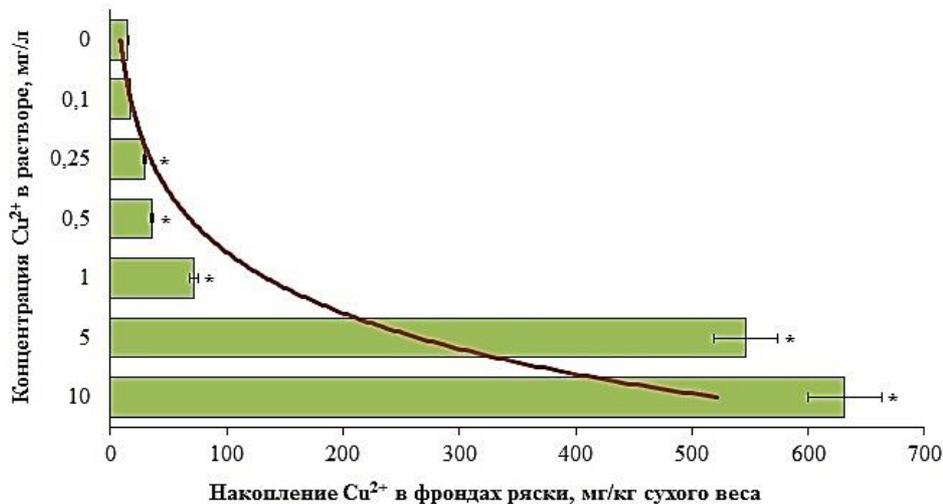
помощью атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS (Varian, США) после мокрого озоления 70% HNO₃ осч. Определение содержания пероксида водорода, продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и фотосинтетических пигментов проводили спектрофотометрически на PD-303UV (APEL, Япония) в четырех биологических повторностях.

Содержание пероксида водорода определяли с использованием ксиленолового реактива при 560 нм; продуктов ПОЛ (в расчете на малоновый диальдегид, МДА) – с использованием тиобарбитуровой кислоты при 532 и 600 нм [3]. Фотосинтетические пигменты экстрагировали в 80%-м растворе ацетона; содержание хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов измеряли при 665, 649 и 440 нм и рассчитывали согласно Lichtenthaler [21].

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Excel 2010 и Statistica 10. Достоверность различий между вариантами оценивали согласно непараметрическому критерию Манна–Уитни при уровне значимости $p < 0,05$. Коэффициенты ранговой корреляции рассчитывали по Спирмену.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов по содержанию меди в фрондах *L. gibba* через 6 суток инкубации на возрастающих концентрациях иона от 0 до 10 мг/л позволил охарактеризовать рост накопления металла как экспоненциальный (рис. 1). Выявлена высокая положительная корреляция между содержанием меди в растворе и в растениях ($r = 0,99$; $p < 0,05$). За 6 суток инкубации на максимальной концентрации металла фронды ряски накапливали до 630 мг Cu²⁺/кг сухого веса. Были выявлены достоверные различия концентраций металла в растениях, инкубированных в растворах с концентрацией меди от 0,25 до 10 мг/л. При этом до концентрации меди в питательной среде 1 мг/л прирост аккумуляции металла в тканях макрофита составлял в среднем 60%. Концентрации, превышающие 1 мг/л меди в среде, вызвали резкое увеличение накопления металла (в среднем в 40 раз по сравнению с контролем). Отсутствие линейной зависимости между концентрацией металла в среде и его содержанием в растениях *L. gibba* отмечалось и ранее [4]. Возможно, это связано с нарушением функционирования барьерных механизмов вследствие окисления липидов мембранных комплексов [9; 15; 18].



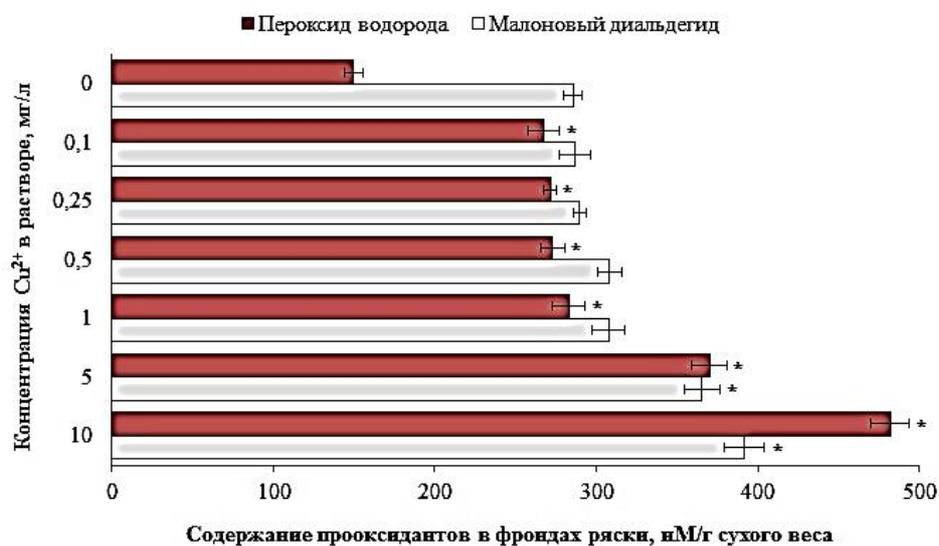
Примечание: линией показан экспоненциальный рост содержания Cu²⁺ в тканях макрофита; * – достоверные различия от контроля при $p < 0,05$

Рис. 1. Накопление меди в фрондах *L. gibba* за 6 суток инкубации на разных концентрациях металла

Повышенные концентрации меди в среде вызвали развитие окислительного стресса у *L. gibba*. Достоверно значимые различия от контроля по содержанию пероксида водорода были зафиксированы, начиная с концентрации Cu²⁺ в среде, равной 0,1 мг/л, а по уровню продуктов ПОЛ – с 5 мг/л (рис. 2).

При максимальной концентрации металла в среде (10 мг/л) содержание пероксида водорода в фрондах ряски было в 3,0, а содержание МДА – в 1,4 раза выше, чем в контроле. Расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена показал высокую положительную связь между содержанием меди в растворе и содержанием прооксидантов (как МДА, так и пероксида водорода,

$r = 0,99$; $p < 0,05$). По-видимому, интенсивное образование пероксида водорода активировало процессы ПОЛ, что, как следствие, привело к нарушению структуры клеточных мембран и изменению их проницаемости для ионов меди, способствуя их активному поступлению в клетки макрофита.



Примечание: *- достоверные различия от контроля при $p < 0,05$

Рис. 2. Содержание пероксида водорода и малонового диальдегида в фрондах *L. gibba* через 6 суток инкубации на разных концентрациях меди

Для оценки влияния меди на состояние пигментного комплекса *L. gibba* были изучены степень депигментации растений и содержание фотосинтетических пигментов. Исследование показало, что для фотосинтетического аппарата ряски характерна достаточно высокая устойчивость к действию этого металла. За 6 суток инкубации заметные изменения окраски фрондов ряски наблюдались лишь при концентрации $\geq 0,5$ мг/л. С возрастанием концентрации меди в среде наблюдалось дальнейшее усиление депигментации, которая выражалась в изменении окраски фрондов *L. gibba* от темно-зеленой до желтовато-зеленой (рис. 3).

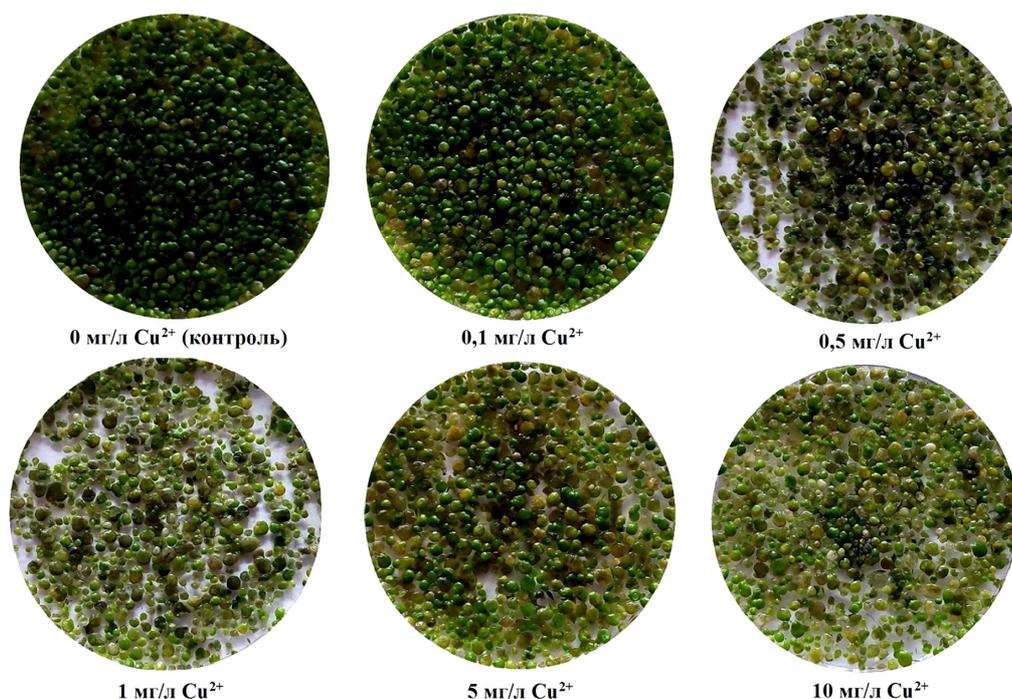
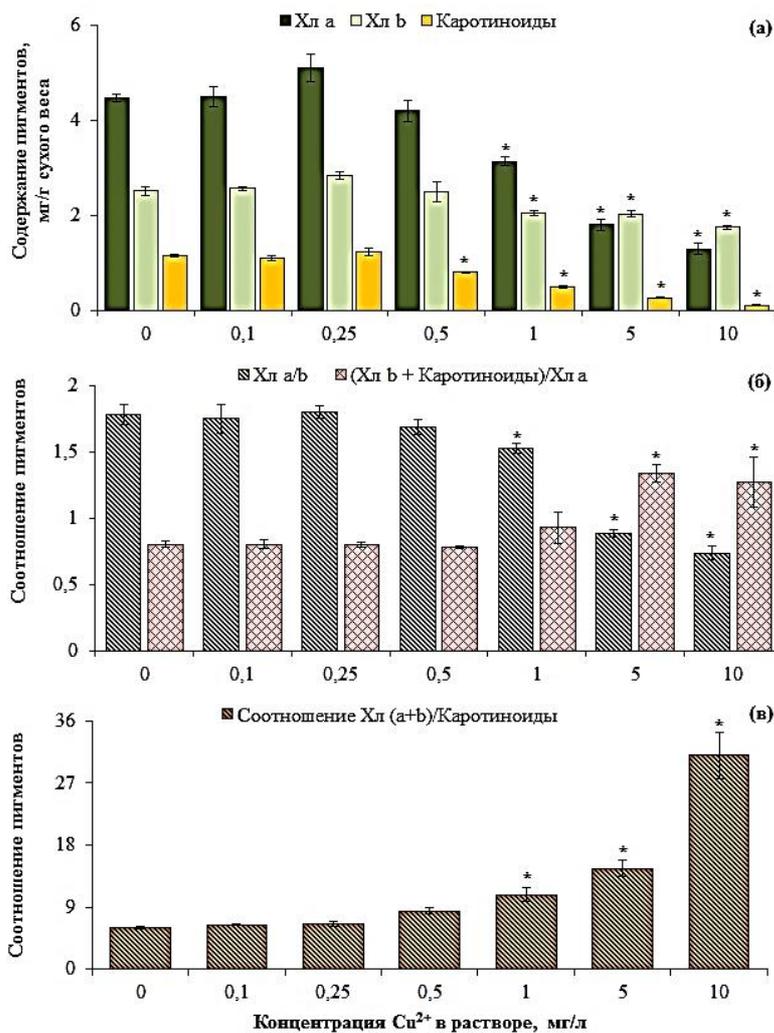


Рис. 3. Состояние фрондов *L. gibba* через 6 суток инкубации в градиенте концентраций меди



Примечание: * – достоверные различия от контроля при $p < 0,05$.

Рис. 4. Содержание фотосинтетических пигментов (а) и их соотношение (б, в) в фрондах *L. gibba* через 6 суток инкубации на разных концентрациях меди

Вероятно, это явление происходило вследствие деградации фотосинтетических пигментов. Кроме того, в градиенте концентраций ионов меди активизировались некротические процессы, сопровождающиеся повреждением и отмиранием фрондов: при максимальной концентрации меди в среде (10 мг/л) доля поврежденных фрондов *L. gibba* составляла около 70% от их общего количества.

При возрастании концентраций ионов меди в среде до 0,5 мг/л содержание хлорофиллов у *L. gibba* достоверно не изменялось (рис. 4а). Концентрация меди 0,25 мг/л в некоторой степени вызвала стимуляцию синтеза фотосинтетических пигментов (в среднем на 10% от контроля). Подобный положительный эффект низких концентраций токсиканта (наподобие эффекта «горемизаса») был отмечен у другого вида ряски [26]: у *Lemna trisulca* при действии низких концентраций ионов меди – от 1 до 10 мкМ. Более высокие концентрации меди вызвали деградацию как хлорофиллов, так и каротиноидов. При максимальной концентрации меди (10 мг/л) содержание хлорофиллов было ниже в среднем в 2,5 раза, а каротиноидов – в 11,5 раз по сравнению с контрольными значениями.

Степень активности фотосинтетического аппарата часто оценивают по соотношению хлорофиллов (Хл а/б) и отношению хлорофиллов к каротиноидам. При возрастании концентрации меди от 0,5 до 10,0 мг/л отношение хлорофилла а к хлорофиллу b снижалось в 2 раза (рис. 4б). Это связано с более резким уменьшением количества Хл а в градиенте концентраций меди, в то время как Хл b оказался более устойчивым к действию этого металла.

Пониженная величина соотношения Хл а/б у *L. gibba* свидетельствует о том, что значительная часть хлорофиллов находится в светособирающем комплексе фотосистем [5]. Анализ соотношения суммы вспомогательных пигментов (Хл b + Каротиноиды) к основному (Хл а), характеризующего долю антенных форм, показал его достоверное увеличение в фрондах ряски при инкубировании в среде с концентрациями меди 5 и 10 мг/л (рис. 4б). При этом отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам, характеризующее в целом светособирающую функцию пигментного комплекса, также достоверно возросло (рис. 4в). В целом обнаружена высокая отрицательная корреляция между концентрацией меди в среде и содержанием фотосинтетических пигментов ($r = -0,87$; $p < 0,05$).

Выводы

Результаты модельного эксперимента позволили установить достоверный фитотоксический эффект действия ионов меди на *L. gibba* в концентрации $\geq 0,5$ мг/л, что выражалось в повышении содержания прооксидантов (пероксида водорода и малонового диальдегида), а также депигментации фрондов ряски из-за деградации фотосинтетических пигментов. Несмотря на это, исследуемый адвентивный вид продемонстрировал достаточно высокую устойчивость к меди, что, вероятно, позволяет ему быть более конкурентоспособным, чем аборигенные водные растения, и успешно внедряться на новые территории в условиях повышенного загрязнения природных водоемов тяжелыми металлами. Проведенное исследование позволило оценить пределы толерантности *L. gibba* к действию меди и выявить репрезентативные физиолого-биохимические параметры, которые можно рекомендовать в качестве биомаркеров токсичности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградова Ю. К., Майоров С. Р., Хорун Л. В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 2010.
2. Капитонова О. А. Материалы к биологии и экологии рясковых (Lemnaceae) Сибири // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2019. Т. 1. № 18. С. 127–131. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2019024>
3. Борисова Г. Г., Малева М. Г., Некрасова Г. Ф., Чукина Н. В. Методы оценки антиоксидантного статуса растений. Екатеринбург, 2012.
4. Некрасова Г. Ф., Малева М. Г., Новачек О. И. Роль белков в связывании Cu, Cd, Ni листьями гидрорифитов // Вестник Нижневартского государственного университета. 2009. № 1. С. 3–15.
5. Новаковская Т. В., Дымова О. В. Видовое разнообразие и пигментный комплекс макрофитов водоемов окрестностей г. Сыктывкара (Республика Коми) // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 5(1). С. 127–134.
6. Хорун Л. В. Проблемы инвазионной экологии растений в зарубежной научной литературе // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2014. № 3. С. 64–77.
7. Шиленко Н. А., Соколова С. А., Анисова С. Н., Лесников Л. А., Лебедев А. Т., Семёнова И. В. Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999.
8. Ater M., Ali N., Kasmi H. Tolérance et accumulation du cuivre et du chrome chez deux espèces de lentilles d'eau: *Lemna minor* L. et *Lemna gibba* L // Journal of Water Science. 2006. V. 19. № 1. P. 57–67. <https://doi.org/10.7202/012597ar>
9. Ayala A., Muñoz M. F., Argüelles S. Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal // Oxidative medicine and cellular longevity. 2014. V. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/360438>
10. Babu T. S., Tripuranthakam S., Greenberg B. M. Biochemical responses of the aquatic higher plant *Lemna gibba* to a mixture of copper and 1, 2-dihydroxyanthraquinone: Synergistic toxicity via reactive oxygen species // Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal. 2005. T. 24. №. 12. С. 3030–3036. <https://doi.org/10.1897/05-073R.1>
11. Banu Doğanlar Z. Metal accumulation and physiological responses induced by copper and cadmium in *Lemna gibba*, *L. minor* and *Spirodela polyrrhiza* // Chemical Speciation & Bioavailability. 2013. Vol. 25. № 2. P. 79–88. <https://doi.org/10.3184/095422913X13706128469701>
12. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. V. 88. № 11. P. 1707–1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>

13. Duman F., Leblebici Z., Aksoy A. Bioaccumulation of nickel, copper, and cadmium by *Spirodela polyrhiza* and *Lemna gibba* // Journal of Freshwater Ecology. 2009. V. 24. № 1. P. 177–179. <https://doi.org/10.1080/02705060.2009.9664279>
14. Galczyńska M., Mankowska N., Milke J., Busko M. Possibilities and limitations of using *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-ranae* and *Ceratophyllum demersum* in removing metals with contaminated water // Journal of Water and Land Development. 2019. V. 40. № 1. P. 161–172. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0018>
15. Hall J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // Journal of experimental botany. 2002. V. 53. № 366. P. 1–11. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>
16. Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B. Trace elements from soil to human. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
17. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Florida: CRC Press, 2001.
18. Kanoun-Boulé M., Vicente J. A., Nabais C., Prasad M. N. V., Freitas H. Ecophysiological tolerance of duckweeds exposed to copper // Aquatic toxicology. 2009. V. 91. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.09.009>
19. Krämer U., Talke I. N., Hanikenne M. Transition metal transport // FEBS letters. 2007. V. 581. № 12. P. 2263–2272. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.04.010>
20. Landolt E. Morphological differentiation and geographical distribution of the *Lemna gibba*-*Lemna minor* group // Aquatic Botany. 1975. V. 1. P. 345–363. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(75\)90036-4](https://doi.org/10.1016/0304-3770(75)90036-4)
21. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382. [http://dx.doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](http://dx.doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
22. Maksymiec W. Effect of copper on cellular processes in higher plants // Photosynthetica. 1997. V. 34. P. 321–342. <https://doi.org/10.1023/A:1006818815528>
23. Megateli S., Semsari S., Couderchet M. Toxicity and removal of heavy metals (cadmium, copper, and zinc) by *Lemna gibba* // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2009. Vol. 72. № 6. P. 1774–1780. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.05.004>
24. Mkandawire M., Taubert B., Dudel E.G. Capacity of *Lemna gibba* L. (duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters // International Journal of Phytoremediation. 2004. Vol. 6. № 4. P. 347–362. <https://doi.org/10.1080/16226510490888884>
25. Perreault F., Samadani M., Dewez D. Effect of soluble copper released from copper oxide nanoparticles solubilisation on growth and photosynthetic processes of *Lemna gibba* L. // Nanotoxicology. 2014. Vol. 8. № 4. P. 374–382. <https://doi.org/10.3109/17435390.2013.789936>
26. Prasad M. N. V., Malec P., Waloszek A., Bojko M., Strzałka K. Physiological responses of *Lemna trisulca* L. (duckweed) to cadmium and copper bioaccumulation // Plant Science. 2001. Vol. 161. № 5. P. 881–889. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00478-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00478-2)
27. Rejmánková E. Comparison of *Lemna gibba* and *Lemna minor* from the production ecological viewpoint // Aquatic Botany. 1975. Vol. 1. P. 423–427. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(75\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0304-3770(75)90042-X)
28. Sasmaz A., Dogan I. M., Sasmaz M. Removal of Cr, Ni, and Co in the water of chromium mining areas by using *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. // Water and Environment Journal. 2016. Vol. 30. № 3-4. P. 235–242. <https://doi.org/10.1111/wej.12185>
29. Sasmaz M., Topal E. I. A., Obek E., Sasmaz A. The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey // Journal of environmental management. 2015. Vol. 163. P. 246–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029>
30. Scheffer M., Szabo S., Gragnani A., Van Nes E. H., Rinaldi S., Kautsky N., Franken R. J. Floating plant dominance as a stable state // Proceedings of the national academy of sciences. 2003. Vol. 100. № 7. P. 4040–4045. <https://doi.org/10.1073/pnas.0737918100>
31. Yilmaz D. D. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae) // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 147. № 1-2. P. 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.047>

REFERENCES

1. Vinogradova, Yu. K., Maiorov, S. R., & Khorun, L. V. (2010). Chernaya kniga flory Srednei Rossii: chuzherodnye vidy rastenii v ekosistemakh Srednei Rossii. Moscow. (In Russian). <https://doi.org/10.14258/pbssm.2019024>
2. Kapitonova, O. A. (2019). Materials to the biology and ecology of duckweeds (Lemnaceae) of Siberia. *Problems of botany of South Siberia and Mongolia*, 18(1). 127-131. (In Russian). <https://doi.org/10.14258/pbssm.2019024>
3. Borisova, G. G., Maleva, M. G., Nekrasova, G. F., & Chukina, N. V. (2012). Metody otsenki antioksidantnogo statusa rastenii. Ekaterinburg. (In Russian).
4. Nekrasova, G. F., Maleva, M. G., & Novachek, O. I. (2009). Rol' belkov v svyazyvanii Cu, Cd, Ni list'yami gidrofitov. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1), 3-15. (In Russian).

5. Novakovskaya, T. V., & Dymova, O. V. (2012). Species diversity and pigment complex of macrophytes from water reservoirs in the Syktyvkar (Komi Republic) neighbourhood. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, (5-1), 127–134. (In Russian).
6. Khorun, L. V. (2014). The main problems of the invasive plant ecology in the foreign literature. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta, Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, 3, 64-77. (In Russian).
7. Shilenko, N. A., Sokolova, S. A., Anisova, S. N., Lesnikov, L. A., Lebedev, A. T., & Semenova, I. V. (1999). Perechen' rybokhozyaistvennykh normativov predel'no-dopustimyykh kontsentratsii (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovnei vozdeistviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh ob"ektov, imeyushchikh rybokhozyaistvennoe znachenie. Moscow. (In Russian).
8. Ater, M., Ali, N., & Kasmi, H. (2006). Tolérance et accumulation du cuivre et du chrome chez deux espèces de lentilles d'eau: *Lemna minor* L. et *Lemna gibba* L. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 19(1), 57-67. <https://doi.org/10.7202/012597ar>
9. Ayala, A., Muñoz, M. F., & Argüelles, S. (2014). Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/360438>
10. Babu, T. S., Tripuranthakam, S., & Greenberg, B. M. (2005). Biochemical responses of the aquatic higher plant *Lemna gibba* to a mixture of copper and 1, 2-dihydroxyanthraquinone: Synergistic toxicity via reactive oxygen species. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 24(12), 3030-3036. <https://doi.org/10.1897/05-073R.1>
11. Banu Doğanlar, Z. (2013). Metal accumulation and physiological responses induced by copper and cadmium in *Lemna gibba*, *L. minor* and *Spirodela polyrhiza*. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 25(2), 79-88. <https://doi.org/10.3184/095422913X13706128469701>
12. Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707-1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
13. Duman, F., Leblebici, Z., & Aksoy, A. (2009). Bioaccumulation of Nickel, Copper, and Cadmium by *Spirodela polyrhiza* and *Lemna gibba*. *Journal of Freshwater Ecology*, 24(1), 177–179. <https://doi.org/10.1080/02705060.2009.9664279>
14. Gałczyńska, M., Mańkowska, N., Milke, J., & Buśko, M. (2019). Possibilities and limitations of using *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-ranae* and *Ceratophyllum demersum* in removing metals with contaminated water. *Journal of Water and Land Development*, 40(1), 161-172. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0018>
15. Hall, J. L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of experimental botany*, 53(366), 1-11. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>
16. Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B. (2007). Trace elements from soil to human. Heidelberg: Springer-Verlag.
17. Kabata-Pendias A., Pendias H. (2001). Trace elements in soils and plants. Florida: CRC Press.
18. Kanoun-Boulé, M., Vicente, J. A., Nabais, C., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2009). Ecophysiological tolerance of duckweeds exposed to copper. *Aquatic toxicology*, 91(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.09.009>
19. Krämer, U., Talke, I. N., & Hanikenne, M. (2007). Transition metal transport. *FEBS letters*, 581(12), 2263-2272. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.04.010>
20. Landolt, E. (1975). Morphological differentiation and geographical distribution of the *Lemna gibba*-*Lemna minor* group. *Aquatic Botany*, 1, 345-363. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(75\)90036-4](https://doi.org/10.1016/0304-3770(75)90036-4)
21. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in enzymology*, 148, 350-382. [http://dx.doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](http://dx.doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
22. Maksymiec, W. (1998). Effect of copper on cellular processes in higher plants. *Photosynthetica*, 34(3), 321-342. <https://doi.org/10.1023/A:1006818815528>
23. Megateli, S., Semsari, S., & Couderchet, M. (2009). Toxicity and removal of heavy metals (cadmium, copper, and zinc) by *Lemna gibba*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 72(6), 1774-1780. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.05.004>
24. Mkandawire, M., Taubert, B., & Dudel, E. G. (2004). Capacity of *Lemna gibba* L. (Duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters. *International Journal of Phytoremediation*, 6(4), 347-362. <https://doi.org/10.1080/16226510490888884>
25. Perreault, F., Samadani, M., & Dewez, D. (2014). Effect of soluble copper released from copper oxide nanoparticles solubilisation on growth and photosynthetic processes of *Lemna gibba* L. *Nanotoxicology*, 8(4), 374-382. <https://doi.org/10.3109/17435390.2013.789936>
26. Prasad, M. N. V., Malec, P., Waloszek, A., Bojko, M., & Strzałka, K. (2001). Physiological responses of *Lemna trisulca* L. (duckweed) to cadmium and copper bioaccumulation. *Plant Science*, 161(5), 881-889. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00478-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00478-2)

27. Rejmánková, E. (1975). Comparison of *Lemna gibba* and *Lemna minor* from the production ecological viewpoint. *Aquatic Botany*, 1, 423-427. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(75\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0304-3770(75)90042-X)

28. Sasmaz, A., Dogan, I. M., & Sasmaz, M. (2016). Removal of Cr, Ni and Co in the water of chromium mining areas by using *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. *Water and Environment Journal*, 30(3-4), 235-242. <https://doi.org/10.1111/wej.12185>

29. Sasmaz, M., Topal, E. I. A., Obek, E., & Sasmaz, A. (2015). The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *Journal of environmental management*, 163, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029>

30. Scheffer, M., Szabo, S., Gragnani, A., Van Nes, E. H., Rinaldi, S., Kautsky, N., ... & Franken, R. J. (2003). Floating plant dominance as a stable state. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(7), 4040-4045. <https://doi.org/10.1073/pnas.0737918100>

31. Yilmaz, D. D. (2007). Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae). *Journal of hazardous materials*, 147(1-2), 74-77. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.047>

Щукина Д. А., Борисова Г. Г., Малева М. Г. Оценка пределов толерантности адвентивного макрофита *Lemna gibba* L. к действию ионов меди // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2020. № 2. С. 33–41. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/05>

Shchukina, D. A., Borisova, G. G., & Maleva, M. G. (2020). Tolerance of adventive macrophyte *Lemna gibba* L. to copper ions: range evaluation. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (2). 33–41. (In Russian) <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/05>

дата поступления: 03 февраля 2020 г.

дата принятия: 12 апреля 2020 г.

© Щукина Д.А., Борисова Г.Г., Малева М.Г.