



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

Издается с сентября 2017 г.
(до 2017 г. – «Экологический вестник»)
Выходит 1 раз в квартал

3

2022

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

МАСКЕВИЧ С. А. – доктор физико-математических наук, профессор; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: direktor@iseu.by

Заместитель главного редактора

ГЕРМЕНЧУК М. Г. – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: germenchuk@iseu.by

Ответственный секретарь

ЛОЗИНСКАЯ О. В. – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: aromia@rambler.ru

Батян А. Н.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Головатый С. Е.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Голубев А. П.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Гричик В. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Дардынская И. В.

Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.

Дзятковская Е. Н.

Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.

Дроздович В. В.

Национальный институт рака, США, Бетесда.

Зафранская М. М.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Кильчевский А. В.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Коноплев А. В.

Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.

Коровин Ю. А.

Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.

Ленгфельдер Э.

Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.

Либератос Г.

Афинский технический университет, Афины, Греция.

Линге И. И.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.

Лукашенко С. Н.

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.

Логинов В. Ф.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Медведев С. В.

ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Набиев И. Р.

Реймский университет, Франция, Реймс.

Степанов С. А.

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.

Стожаров А. Н.

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.

Тарутин И. Г.

ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	MASKEVICH S. A. , doctor of science (physics and mathematics), professor; director of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: direktor@iseu.by
Deputy editor-in-chief	GERMENCHUK M. G. , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: germenchuk@iseu.by
Executive secretary	LOZINSKAYA O. V. , senior lecturer at the department of general biology and genetics of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. E-mail: aromia@rambler.ru
<i>Batyan A. N.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus
<i>Dardynskaya I. V.</i>	Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
<i>Dziatkovskaya E. N.</i>	Institute of Education Development Strategy of the Russian Academy of Education, Moscow, Russia.
<i>Drozdovitch V. V.</i>	Radiation Epidemiology Branch, DCEG (Division of Cancer Epidemiology and Genetics), National Cancer Institute, Bethesda MD.
<i>Zafranskaya M. M.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Kilchevsky A. V.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Konoplev A. V.</i>	Environmental Radioactivity Institute, Fukushima University, Japan.
<i>Korovin Y. A.</i>	Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
<i>Lengfelder E.</i>	Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
<i>Lyberatos G.</i>	Athens Technical University, Athens, Greece.
<i>Linge I. I.</i>	Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
<i>Lukashenko S. N.</i>	Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia.
<i>Loginov V. F.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Medvedev S. V.</i>	The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Nabiev I. R.</i>	University of Reims Champagne-Ardenne (URCA), France.
<i>Stepanov S. A.</i>	International Independent Ecological and Political University, Moscow, Russia.
<i>Stozharov A. N.</i>	Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
<i>Tarutin I. G.</i>	N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus.

УДК 574.24

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЯСКИ МАЛОЙ (*LEMNA MINOR*) В УСЛОВИЯХ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ С ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Е. П. ЖИВИЦКАЯ¹⁾, А. Г. СЫСА¹⁾, И. Э. БУЧЕНКОВ¹⁾, Е. К. ВЛАСЕНКО²⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Научно-практический центр ЛОТИОС,
ул. Змитрака Бядули, 10-212, 220034, г. Минск, Беларусь

В работе научно обосновано использования ряски малой *Lemna minor* в качестве тест-объекта для целей экологического мониторинга при загрязнении катионами меди (II), железа (II), свинца и цинка. Исследовано влияние катионов металлов в диапазоне концентраций от 0,1 до 10,0 мг/л на удельную скорость роста и динамику изменения общей площади листовых пластинок (фрондов) пресноводных растений ряски малой. Показано, что в области концентраций катионов Cu^{2+} и Fe^{2+} 0,1–0,25 мг/мл скорость роста ряски не отличалась от контрольных растений, в то время как катионы цинка и свинца оказывали 17,3- и 30%-ный ингибиторный эффект соответственно. Анализ кривых изменения удельной скорости роста растений в области концентраций 0,5–2,5 мг/л свидетельствует, что эффективность ингибирующего действия на рост ряски малой снижалась в ряду $\text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$, что также подтвердилось данными по динамике снижения отношений средних площадей фрондов до и через 7 дней культивирования. Результаты работы показывают, что ряска малая (*Lemna minor*) может быть использована в биоиндикационных мероприятиях в отношении содержания элементов группы тяжелых металлов (меди (II), железа (II), свинца и цинка) в водных объектах.

Ключевые слова: гидробионты; биоиндикация; токсичность; экологический мониторинг; удельная скорость роста.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках проекта 10.3.05.09 ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограмма 3 «Радиация и биологические системы» на 2021–2025 годы (№ ГР 20211863).

Образец цитирования:

Живицкая ЕП, Сыса АГ, Бученков ИЭ, Власенко ЕК. Характеристика изменчивости морфофизиологических показателей ряски малой (*Lemna minor*) в условиях культивирования с тяжелыми металлами. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2022;3:26–32. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-26-32>

For citation:

Zhyvitskaya EP, Sysa AG, Butchenkow IE, Vlasenko EK. Characteristics of variability of morpho-physiological parameters of lesser duckweed (*Lemna minor*) under heavy metals cultivation. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2022;3:26–32. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-26-32>

Авторы:

Елена Петровна Живицкая – старший преподаватель кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Алексей Григорьевич Сыса – кандидат химических наук, доцент; декан факультета экологической медицины.

Игорь Эдуардович Бученков – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и генетики.

Евгений Константинович Власенко – кандидат биологических наук; заведующий отделом экспериментальной медицины и фармации.

Authors:

Alena P. Zhyvitskaya, senior lecturer at the department of environmental medicine and radiobiology.

alena.zhyvitskaya@gmail.com

Aliaksei G. Sysa, PhD (chemistry), docent; dean of the environmental medicine faculty.

aliaksei.sysa@iseu.by

Igor E. Butchenkov, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of general biology and genetics, environmental medicine faculty.

butchenkow@mail.ru

Evgenii K. Vlasenko, PhD (toxicology); head of the department of experimental medicine and pharmacy.

evgenii_vlasenko@mail.ru

CHARACTERISTICS OF VARIABILITY OF MORPHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF LESSER DUCKWEED (*LEMNA MINOR*) UNDER HEAVY METALS CULTIVATION

E. P. ZHYVITSKAYA^a, A. G. SYSA^a, I. E. BUTCHENKOW^a, E. K. VLASENKO^b

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bScientific and practical center LOTIOS,
10-212 Zmitraka Byaduli Street, Minsk 220034, Belarus
Corresponding author: A. Sysa (aliaksei.sysa@iseu.by)

It was shown scientifically substantiated the use of the lesser duckweed (*Lemna minor* L.) as a test object for environmental monitoring purposes when contaminated with copper (II), iron (II), lead and zinc cations. The influence of metal cations in the concentration range from 0.1 to 10.0 mg/l on the specific growth rate and dynamics of changes in the total area of leaf blades (fronds) of freshwater duckweed plants has been studied. It was shown that in the concentration range of Cu^{2+} and Fe^{2+} cations of 0.1–0.25 mg/ml, the growth rate of duckweed did not differ from control plants, while zinc and lead cations had a 17.3 % and 30 % inhibitory effect, respectively. Analysis of the curves of changes in the specific rate of algae growth in the concentration range of 0.5–2.5 mg/l showed that the effectiveness of the inhibitory effect on the growth of duckweed decreased in the series $\text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$, which was also confirmed by data on the dynamics of the decrease in the average frond areas before and 7 days after cultivation. The results of the work show that the small duckweed (*Lemna minor*) can be used in bioindication measures regarding the content of elements of the group of heavy metals (copper (II), iron (II), lead and zinc) in water bodies.

Keywords: hydrobionts; bioindication; toxicity; environmental monitoring; specific growth rate.

Acknowledgements. This work was supported by Ministry of Education of the Republic of Belarus (project 10.3.05.09 SPSR «Natural resources and environment» subprogram 3 «Radiation and biological systems» for 2021–2025 (No. SR 20211863).

Введение

В условиях глобального антропогенного воздействия на водоемы возрастает необходимость изучения соотношения природных и антропогенных факторов в развитии их экосистем. В этом плане перспективность исследования речных экосистем (как накапливающих элементов ландшафта) определяется тем, что их изменение служит показателем антропогенной нагрузки и на территорию в целом.

Малая предсказуемость антропогенного воздействия вследствие нелинейности системных процессов при определении степени нарушения природного лимногенеза требует изучения изменений разных звеньев экосистем. При этом важно учитывать неоднозначность отклика последних, которая связана с разнообразием характеристик водоемов, их взаимодействием с водосборами, влиянием ландшафта и климата. Наряду с описанием изменения структурно-функциональных характеристик сообществ, необходимо установление регуляторных механизмов для выявления устойчивости экосистем и прогноза их развития [1].

Без адекватных знаний о функционировании гидробионтов нельзя решить главную задачу гидроэкологии: научиться управлять водными экосистемами. Не вызывает сомнений, что биоиндикационные исследования в рамках гидроэкологического мониторинга должны носить системный характер и быть одной из приоритетных областей водной экологии.

Наблюдаемый подъем в области изучения экологического состояния водоемов и водотоков методами биоиндикации с использованием донных сообществ в значительной степени связан с необходимостью решения практических задач, касающихся защиты и сохранения экологических систем континентальных водоемов и в значительной степени обусловлен успехами развития действенной теории функционирования экологических систем [2]. Однако реализация теоретических предпосылок функционирования при изучении проточных гидроэкосистем до настоящего времени затруднена в связи с отсутствием надежных сведений по экологии отдельных видов и групп животных, которые могут оказывать значительное влияние на функциональные характеристики надорганизменных систем [3]. Необходимо постоянное накопление информации, ее анализ и синтез, в процессе которых структурно-функциональные особенности биоценозов и их биоиндикационные качества приводятся в соответствие друг с другом. Поиск и использование информативных компонентов при оценке экологического состояния водотоков является весьма актуальной задачей.

Экологические исследования поверхностных вод в последние десятилетия переживают пору расцвета: стремительно накапливаются гидроэкологические знания, создаются новые направления исследований. Одной из важных задач в высокоиндустриальных районах является определение критических уровней антропогенной нагрузки на водотоки. Однако отсутствие постоянного контроля за гидроэкологическим

состоянием водоемов и водотоков существенно затрудняет возможности экологических исследований в плане оценки соотношения между интенсивностью антропогенной нагрузки и реакцией водной экосистемы.

Экологические исследования пресноводных сообществ зачастую носят скорее описательный, чем объяснительный характер в исследованиях, связанных с проблемами загрязнения рек, что вызвано их разнообразием и динамичной системой. Чтобы добиться адекватных данных при изучении водотоков необходимо предложить способы комплексной оценки состояния водных экосистем на основании гидрохимических и гидробиологических показателей, которые позволят количественно оценить состояние водотока или участка реки и ранжировать критические уровни антропогенных нагрузок на экосистему¹.

Биоиндикация – активно развивающаяся в современной экологии область научных исследований. В большинстве случаев целью применения различных индикаторов и индексов является оценка экологического состояния водных объектов; они используются и для принятия решений по обеспечению устойчивого развития территорий, регионов, экосистем разного масштаба. Изучение состава живых организмов водоема позволяет быстро установить его санитарное состояние, определить степень и характер загрязнения и пути его распространения в водоеме, а также дать количественную характеристику протекания процессов естественного самоочищения.

Различные виды живых существ показывают, чем загрязнена окружающая среда. Объектами-индикаторами могут быть фито- и зоопланктон, бентос, макрофиты, рыбы и др. Получены научные данные о том, что повышенное содержание в воде различных токсикантов приводит к массовым нарушениям эмбрионального и личиночного развития, появлению многочисленных уродств. У молоди рыб нередко развиваются опухоли и нарушение отдельных органов (печень, мозг, жаберный аппарат и др.). Кроме того, в одном и том же водоеме могут быть акватории с неблагоприятными условиями для гидробионтов [4].

Как показывает многолетняя практика при токсикологической оценке водных систем обязательными являются эксперименты на тест-объекте ряски малая (*Lemna minor* L.) [5].

Произрастает ряска малая в большинстве стоячих водоемов на территории всей страны с различным уровнем загрязнения. Различные виды ряски имеют исключительную способность захватывать и аккумулировать тяжелые металлы, металлоиды, превосходя в этом плане водоросли и другие макрофиты [6].

Цель исследования: рассмотреть особенности использования водных макрофитов (на примере ряски малой (*Lemna minor*)) в биоиндикационных мероприятиях в отношении содержания элементов группы тяжелых металлов (меди (II), железа (II), свинца и цинка) в водных объектах.

Материалы и методы исследования

Оценка влияния исследуемых веществ на ряску *L. minor*. Материалом для работы послужили растения *Lemna minor*, собранные в период 30.05.2022–05.06.2022 гг. из пресноводного водоема (Волковичское водохранилище) в окрестностях города Минска. Вид определен согласно его морфологии [7].

Испытания на ингибирование роста пресноводных растений ряски малой (*Lemna minor*) катионами меди (II), железа (II), свинца и цинка диапазоне концентраций от 0,1 до 10,0 мг/л проводили согласно межгосударственного стандарта ГОСТ 32426–2013². Для приготовления растворов использовали соли: $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Для выращивания растений использовалась водопроводная дехлорированная (отстоянная) вода объемом 100 см³ в цилиндрических сосудах объемом 250 см³. В каждый такой сосуд с разведением исследуемых соединений помещали десять растений ряски с одной развитой и одной развивающейся лопастью по три повторности для каждого разведения и шесть повторностей для контроля. Растения культивировали в лабораторных условиях при искусственном освещении (11-часовом световом дне, освещенность 1000 лк) при температуре 24 °С в течение семи суток. Контролем служила дехлорированная водопроводная вода [8].

Показателями токсичности в опыте служили удельная скорость роста (темп роста) и общая площадь пластинок ряски.

Средняя удельная скорость роста (темп роста)² рассчитывается как логарифметрическое увеличение темпа роста – количества фрондов для каждой параллели опытных и контрольных групп [9]:

$$\mu_{i-j} = \frac{\ln N_j - \ln N_i}{t}, \quad (1)$$

где μ_{i-j} – средняя удельная скорость роста от времени i до времени j ;

N_j – переменная теста в опыте во время j ;

¹Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2020 год [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nsmos.by/content/777.html> (дата обращения: 05.07.2022).

²ГОСТ 32426-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Испытание ряски на угнетение роста. [Электронный ресурс]. Кодекс. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200107387> (дата обращения: 05.07.2022 г.).

N_i – переменная теста в контроле во время i ;
 t – период времени от i до j .

Расчет площади фронда (пластинок ряски) проводили по фотографиям, изображения проанализированы с помощью программного обеспечения *Image J* («NIH», USA).

Статистический анализ. Для построения моделей доза-эффект в настоящей работе использована лог-логистическая модель с четырьмя параметрами (b , c , d , e) LL.4 библиотеки *dgm* в среде статистических вычислений R (GraphPad Software, Inc.), которая имеет вид:

$$\varphi(x) = c + \frac{d-c}{1 + e^{b(\log x - \log e)}} \quad (2)$$

Оцениваемые параметры моделей имеют вполне определенный физический смысл. В частности, для логистической модели:

- параметры c и d определяют нижнюю и верхнюю горизонтальные асимптоты сигмоидной кривой;
- e соответствует положению точки перегиба;
- b – коэффициенту угла наклона в области переходного состояния.

Подгонка параметров моделей к анализируемым эмпирическим данным осуществлялась с использованием метода наименьших квадратов с учетом специально подбираемых весовых коэффициентов.

Статистический анализ оцениваемых параметров проводился с использованием t -критерия Стьюдента, с помощью которого проверялась гипотеза о равенстве каждого коэффициента нулю и рассчитывались p -значения, определяющие достигнутый уровень значимости. Проверка статистической значимости модели в целом осуществлялась путем ее сравнения с моделью простой линейной регрессии, имеющей нулевой коэффициент наклона (горизонтальная линия регрессии соответствует отсутствию зависимости доза-эффект).

Результаты исследования и их обсуждение

Угнетение скорости роста – основной параметр, используемый при тестировании воды на токсичность, при этом рекомендуемая продолжительность воздействия – 7 дней. Результаты исследований приведены на рис. 1.

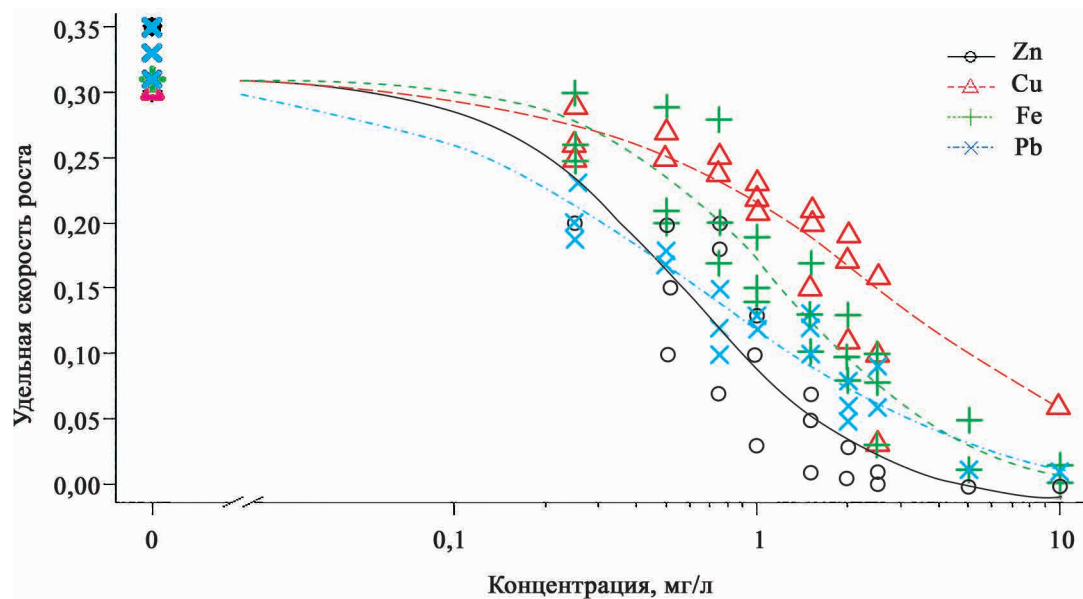


Рис. 1. Динамика средней удельной скорости роста ряски малой (*Lemna minor*) в зависимости от концентрации изученных катионов по итогам семидневного культивирования после воздействия

Fig. 1. Lesser duckweed (*Lemna minor*) average specific growth rate dynamics in dependence on the concentration of metal cations after 7 days of exposure

Как следует из данных, представленных на рис. 1, все исследованные катионы в исследуемом диапазоне концентраций (от 0,1 до 10,0 мг/л) приводят к снижению скорости роста ряски малой на 87–94 % по сравнению с контролем. Через 7 дней после культивирования в среде, содержащей 0,25 мг/мл Cu^{2+} или Fe^{2+} скорость роста ряски не отличалась от контрольных растений. В диапазоне концентраций 0,5–2,0 мг/мл происходило значительное снижение средней удельной скорости роста: на 51 % в случае катионов меди (II) и на 79 % в случае катионов железа (II).

Катионы свинца и цинка оказывали более выраженный эффект на скорость роста ряски малой. Так, уже при концентрации ионов 0,25 мг/мл наблюдалось снижение на 17,3 % скорости роста в случае ионов цинка и 30 % – в случае ионов свинца. В диапазоне концентраций 0,5–2,0 мг/мл катионы Zn^{2+} практически полностью подавляли рост ряски малой (94 %), а ионы Pb^{2+} – на 83,7 %.

Статистический анализ значимости оцененных параметров модели для исследуемых соединений по t -критерию представлен в таблице.

Оценка параметров модели влияния катионов меди (II), железа (II), свинца и цинка на скорость роста ряски малой (*Lemna minor*)

Estimation of the parameters of the model of the influence of copper (II), iron (II), lead and zinc cations on the growth rate of the lesser duckweed (*Lemna minor*)

Параметр	Оценка (мг/л)	Ст. ошибка	t -критерий	p -значение
b : наклон области перегиба (Cu^{2+})	0,9	0,19	4,7974	$5,08 \cdot 10^{-6***}$
b : наклон области перегиба (Fe^{2+})	1,32	0,30	4,4603	$1,98 \cdot 10^{-5***}$
b : наклон области перегиба (Pb^{2+})	0,88	0,21	4,2904	$3,85 \cdot 10^{-5***}$
b : наклон области перегиба (Zn^{2+})	1,39	0,36	3,9068	$1,62 \cdot 10^{-4***}$
c : нижний предел	–0,02	0,02	–0,7799	0,44
d : верхний предел	0,32	0,01	22,5024	$< 2,2 \cdot 10^{-16***}$
e : ED_{50} (Cu^{2+})	2,54	0,62	4,0873	$8,32 \cdot 10^{-5***}$
e : ED_{50} (Fe^{2+})	1,24	0,22	5,7380	$8,56 \cdot 10^{-8***}$
e : ED_{50} (Pb^{2+})	0,66	0,17	3,9449	$1,41 \cdot 10^{-4***}$
e : ED_{50} (Zn^{2+})	0,58	0,10	5,6052	$1,56 \cdot 10^{-7***}$

Примечание. Уровень значимости *** – $p < 0,001$.

Установлено, что коэффициенты наклона (b), верхнего предела (d), а также значений ED_{50} статистически значимы для всех изученных катионов. Зависимость скорости роста от концентрации катионов на 7-й день описываются уравнениями:

1) для иона Cu^{2+} :

$$\text{удельная скорость роста} = -0,02 + \frac{0,32 + 0,02}{1 + e^{0,90 \cdot (\log C(\frac{мг}{л}) - \log 2,54)}};$$

2) для катиона Fe^{2+} :

$$\text{удельная скорость роста} = -0,02 + \frac{0,32 + 0,02}{1 + e^{1,32 \cdot (\log C(\frac{мг}{л}) - \log 1,24)}};$$

3) для иона Pb^{2+} :

$$\text{удельная скорость роста} = -0,02 + \frac{0,32 + 0,02}{1 + e^{0,88 \cdot (\log C(\frac{мг}{л}) - \log 0,66)}};$$

4) для катиона Zn^{2+} :

$$\text{удельная скорость роста} = -0,02 + \frac{0,32 + 0,02}{1 + e^{1,39 \cdot (\log C(\frac{мг}{л}) - \log 0,58)}}.$$

Характер кривых изменения удельной скорости роста ряски в области концентраций 0,5–2,5 мг/л свидетельствует о том, что эффективность ингибирующего действия на рост ряски малой снижается в ряду $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Fe^{2+} > Cu^{2+}$. Это подтверждается рассчитанными значениями ED_{50} : $ED_{50} Zn^{2+}$ (0,58 мг/л) $\approx$ $ED_{50} Pb^{2+}$ (0,66 мг/л) $<$ $ED_{50} Fe^{2+}$ (1,24 мг/л) $<$ $ED_{50} Cu^{2+}$ (2,54 мг/л).

Измерение удельной скорости роста после 7 дней после культивирования с катионами металлов в диапазоне концентраций 2,5–10,0 мг/л было крайне затруднено, так как в отдельных случаях наблюдалось значительное сокращение площади вновь появляющихся фрондов. Поэтому следующим параметром, который важен при оценке последствий действия катионов меди (II), железа (II), свинца и цинка на ряску малую, является общая площадь фрондов (рис. 2).

После семидневного воздействия катионов свинца и цинка в концентрациях свыше 0,5 мг/мл, а катионов меди (II) и железа (II) в концентрациях свыше 0,75 мг/л дней отмечается сокращение площади фрондов (рис. 2). При этом 50-процентное снижение площадей фрондов ряски малой наблюдалось при семидневном культивировании в присутствии концентрации катионов цинка (0,75 мг/л), свинца (1,0 мг/л),

железа (II) (2,0 мг/л), а также меди (II) (2,5 мг/л), что полностью коррелирует с данными, полученными при анализе удельной скорости роста.

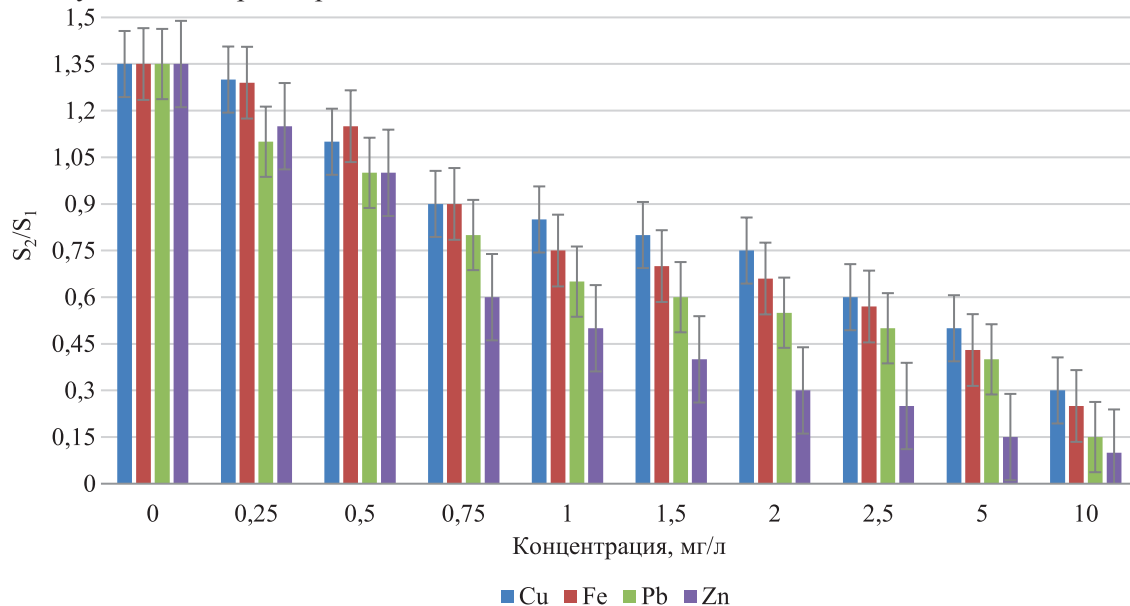


Рис. 2. Отношение средних значений площадей фрондов ряски малой (*Lemna minor*) до и через 7 дней культивирования (S_1 – площадь фрондов до культивирования, S_2 – площадь фрондов после культивирования)

Fig. 2. Ratio of average frond areas of the lesser duckweed (*Lemna minor*) before and after 7 days of cultivation (S_1 – frond area before cultivation, S_2 – frond area after cultivation)

Закключение

В работе исследовалось влияние катионов меди (II), железа (II), свинца и цинка на лабораторную культуру ряски малой *Lemna minor* по показателям стандартных тестов. При этом выявлено, что:

1) все исследованные катионы в исследуемом диапазоне концентраций (от 0,1 до 10,0 мг/л) приводили к снижению скорости роста ряски малой на 87–94 % по сравнению с контролем;

2) характер кривых изменения удельной скорости роста ряски в области концентраций 0,5–2,5 мг/л свидетельствует о том, что эффективность ингибирующего действия на рост ряски малой снижается в ряду $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Fe^{2+} > Cu^{2+}$;

3) После семидневного воздействия катионов свинца и цинка в концентрациях свыше 0,5 мг/мл, а катионов меди (II) и железа (II) в концентрациях свыше 0,75 мг/л через 7 дней отмечалось сокращение площади фрондов ряски.

Результаты работы показывают, что ряска малая (*Lemna minor*) может быть использована в биоиндикационных мероприятиях в отношении содержания элементов группы тяжелых металлов (меди (II), железа (II), свинца и цинка) в водных объектах.

Библиографические ссылки

1. Баринова СС, Медведева ЛА, Анисимова ОВ. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: [б. н.]; 2006. 498 с.
2. Зверькова ЮС. Экологическая оценка реки Днепр (в пределах Смоленской области) по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей [автореферат диссертации]. Смоленск: СГУ; 2011. 26 с.
3. Бухарин ОВ, Розенберг ГС, редакторы. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. Москва: Наука; 2007. 403 с.
4. Головатюк ЛВ. Макрозообентос равнинных рек бассейна Нижней Волги как показатель их экологического состояния (на примере р. Сок и ее притоков) [автореферат диссертации]. Тольятти: [б. н.]; 2005.
5. Петракова ЕА. Поглотительная способность макрофитов в отношении групп тяжелых металлов. В: Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции (16–18 мая 2016 г.). Том 1. Физико-математические, технические науки и экология. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета; 2016. с. 282–285.
6. Раимбеков КТ. Использование макрофитов для доочистки городских сточных вод. Инновации в науке. 2017;4(65):8–10.
7. Губанов ИА, и др. *Lemna minor* L. – Ряска маленькая. В: Иллюстрированный определитель растений Средней России. В 3 томах. Москва: КМК; 2002. Том 1. Папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, покрытосеменные (однодольные). с. 409.
8. Жмур НС. Экотоксикологический контроль. Приемы исследования и лабораторная практика. Москва: Издательство «АК-ВАРОС»; 2018. 472 с.
9. OECD Guidelines for the testing chemicals. *Lemna* sp. Growth Inhibition Test. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris: [publisher unknown]; 2006.

References

1. Barinova SS, Medvedeva LA, Anisimova OV. *Bioraznoobraziye vodorosley – indikatorov okruzhayushchey sredy* [Biodiversity of algae – indicators of the environment]. Tel Aviv: [publisher unknown]; 2006. 498 p. Russian.
2. Zverkova JuS. *Ekologicheskaya otsenka reki Dnepr (v predelakh Smolenskoj oblasti) po kompleksu gidrokhimicheskikh i gidrobiologicheskikh pokazateley* [Ecological assessment of the Dnieper river (within the Smolensk region) on the complex of hydrochemical and hydrobiological indicators] [PhD thesis]. Smolensk: SSU; 2011. 26 p. Russian.
3. Buharin OV, Rozenberg GS, editors. *Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya ravninnykh rek* [Bioindication of the ecological state of lowland rivers]. Moscow: Nauka; 2007. 403 p. Russian.
4. Golovatjuk LV. *Makrozoobentos ravninnykh rek bassejna Nizhney Volgi kak pokazatel' ikh ekologicheskogo sostoyaniya (na primere r. Sok i yeye pritokov)* [Macrozoobenthos of lowland rivers of the Lower Volga basin as an indicator of their ecological state (on the example of R. Sok and its tributaries)] [PhD thesis]. Togliatti: [publisher unknown]; 2005. Russian.
5. Petrakova EA. Absorption capacity of macrophytes in relation to groups of heavy metals. In: *Donetskiye chteniya 2016. Obrazovaniye, nauka i vyzovy sovremennosti: Materialy I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (16–18 maya 2016 g.). Tom 1. Fiziko-matematicheskkiye, tekhnicheskkiye nauki i ekologiya* [Donetsk readings 2016. Education, science and challenges of our time: Materialy I International Scientific Conference (2016 May 16–18). Volume 1. Physical and mathematical, technical sciences and ecology]. Rostov-na-Donu: Publishing House of the Southern Federal University; 2016. p. 282–285. Russian.
6. Raimbekov KT. The use of macrophytes for the post-treatment of urban wastewater. *Innovatsii v nauke* [Innovations in Science]. 2017;4(65):8–10. Russian.
7. Gubanov IA, et al. *Lemna minor* L. – Small duckweed. In: *Illustrated determinant of plants of Central Russia*. In 3 volumes. Moscow: KMK; 2002. Volume 1. Ferns, horsetails, plauns, gymnosperms, angiosperms (monocotyledons). p. 409. Russian.
8. Zhmur NS. *Ekotoksikologicheskij kontrol'. Priyemy issledovaniya i laboratornaya praktika* [Ecotoxicological control. Methods of research and laboratory practice]. Moscow: Publishing house AKVAROS; 2018. 472 p. Russian.
9. OECD Guidelines for the testing chemicals. *Lemna* sp. Growth Inhibition Test. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris: [publisher unknown]; 2006.

Статья поступила в редколлегию 25.07.2022.
Received by editorial board 25.07.2022.