



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 57.044

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28008

Воздействие La(III), Cu(II) и их комбинации на одноклеточную водоросль *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb**М. А. Сысолятина¹, А. М. Шеромов¹, А. С. Олькова¹✉**,¹Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская область, Россия,
e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Поступила в редакцию: 06.02.2025 г.; после доработки: 22.02.2025 г.; принята в печать: 24.02.2025 г.

Аннотация – Металлы попадают в окружающую среду совместно. Целью представленной работы была оценка воздействия La(III), Cu(II) и их комбинации (1:1) на одноклеточную водоросль *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb при низких концентрациях металлов в водной среде. В воду питьевого качества добавляли соли CuSO₄·5H₂O и La₂(SO₄)₃·8H₂O до достижения концентраций 0,000008–0,0016 ммоль/л в расчете на ион металла или их сумму (1:1). Проводили биотестирование модельных растворов по методу учета численности клеток водорослей через 72 часа экспозиции. Действие Cu(II) имело слабый стимулирующий эффект: максимально численность клеток увеличилась в растворах с 0,0008 и 0,0016 ммоль/л металла (в 1,2 и 1,3 раза к контролю). La(III) во всем диапазоне тестируемых концентраций значительно стимулировал увеличение численности клеток водорослей (4,2–11,1 раз). При совместном действии Cu(II) и La(III) гормезис имел среднюю степень по сравнению с эффектами металлов по отдельности (1,8–2,9 раз к контролю). Таким образом, впервые показано, что витальные концентрации Cu(II), La(III) и их комбинаций в водной среде приводят к увеличению размножения зеленых водорослей, причем эффекты La(III) превышают эссенциальное действие Cu(II). Следовательно, даже незначительное поступление металлов в водные экосистемы может приводить к их эвтрофикации.

Ключевые слова: биотестирование, лантан, медь, совместные эффекты, *Scenedesmus quadricauda*, токсичность, металлы

Monitoring soil, air, water status

UDC 57.044

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28008

La(III), Cu(II) and their combinations effect on the unicellular alga *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb**Maria A. Sysolyatina¹, Anton M. Sheromov¹, and Anna S. Olkova¹✉**¹Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russia,
e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Received: February 6, 2025; Revised: February 22, 2025; Accepted: February 24, 2025

Abstract – Metals enter the environment together. The aim of the work was to evaluate the effect of La(III), Cu(II) and their combination (1:1) on the unicellular alga *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb at low concentrations of metals in the aquatic environment. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ salts were added to drinking water to achieve concentrations of 0.000008–0.0016 mmol/l calculated per metal ion or their sum (1:1). Biotesting was carried out using the method of accounting for the number of algae cells after 72 hours of exposure. The effect of Cu(II) had a slight stimulating effect: the number of cells increased maximally in solutions with 0.0008 and 0.0016 mmol/l of metal (1.2–1.3 relative to control). La(III) significantly stimulated increasing amount of algae cells (4.2–11.1 times) for the entire range of tested concentrations. With the combined effect of Cu(II) and La(III), the hormesis was of medium intensity compared to the effects of the metals separately (1.8–2.9 times of the control). Thus, it was shown for the first time that vital concentrations of Cu(II), La(III) and their combinations in the aquatic environment lead to an increase in the reproduction of green algae. The effects of La(III) exceed the essential effect of Cu(II). Consequently, even a minor influx of metals into aquatic ecosystems can lead to their eutrophication.

Keywords: Bioassay, lanthanum, copper, synergistic effects, *Scenedesmus quadricauda*, toxicity, metals.

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные элементы (РЗЭ), включая лантаноиды, иттрий (Y) и скандий (Sc), приобретают все большее значение в промышленном обороте металлов. В связи с этим возникает обеспокоенность научного сообщества по поводу возможных токсических эффектов этих элементов [1, 2]. В то же время металлы, условно относимые к группе тяжелых, также не утрачивают своего значения для производства и техники [3, 4]. Более того, некоторые РЗЭ и ТМ, например, La и Cu используются совместно, например, в сплавах [5].

Экологические эффекты и риски ТМ в экосистемах известны и широко изучены [6, 7, 8]. РЗЭ встречаются в природе в незначительных количествах. Тем не менее, имеются сведения о том, что повышение концентрации РЗЭ в окружающей среде, особенно в водных системах, создает потенциальные экотоксикологические риски для организмов [9, 10, 11].

Химические факторы среды существенно влияют на виды соединений и биодоступность РЗЭ, а также на связанную с этим токсичность. Например, в воде с рН ниже 7–8 РЗЭ в основном существуют в виде свободных ионов [12]. Присутствие неорганических лигандов, таких как фосфат, карбонат, сульфат и хлорид, наряду с органическими коллоидами, такими как гуминовые кислоты и природные органические вещества, может изменять их растворимость и сорбцию на поверхностях [13, 14, 15]. Эффекты комбинаций РЗЭ с другими металлами остаются недостаточно изученными.

В водных экосистемах указанные неизвестные эффекты особенно актуально изучать в отношении одноклеточных водорослей, так как они являются основой пищевой цепи. Как продуценты они аккумулируют солнечную энергию в виде органических веществ, накапливая при этом и элементы, растворенные в воде. Далее вещества естественного и антропогенного происхождения мигрируют по цепям питания, что может приводить к эффектам биоаккумуляции и биомагнификации элементов.

Следовательно, уровень продуцентов крайне важен для понимания экотоксикологических процессов, происходящих в экосистеме в целом.

Сведения о действии РЗЭ, в частности, La на растения крайне противоречивы. Встречаются сообщения о стимулирующем характере действия La как на растительные организмы на клеточном, так и организменном уровне [16, 17]. С другой стороны, доказаны отрицательные эффекты для развития растений [18, 19, 20]. Данных о совместном действии La и Cu на низшие растения нами не найдены.

Целью представленной работы была оценка воздействия La(III), Cu(II) и их комбинаций (1:1) на одноклеточную водоросль *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb при низких концентрациях металлов в водной среде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования были модельные растворы. Они готовились на водопроводной воде, удовлетворяющей требованиям к питьевым водам. Добавками были сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и сульфат лантана $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, а также и комбинации этих солей. Диапазон тестируемых концентраций составил 0,000008–0,0016 ммоль/л в расчете на ион металла или их сумму (1:1).

Тест-организмом была одноклеточная водоросль *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb, 1829. Использовалась альгологически чистая культура, поддерживаемая в Научно-исследовательской экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета (г. Киров, Россия) на среде Успенского.

Свежеприготовленные растворы тестировали на острую токсичность по показателю изменения численности клеток по сравнению с контролем (вода без добавок). Экспозиция – 72 часа. Метод учета тест-функции – подсчет клеток в камере Горяева под микроскопом Микромед-2 (Россия). Алгоритмы биотеста и обработки первичных результатов соответствовали методике [21].

Данные обрабатывали стандартными методами с представлением результатов на диаграммах в виде среднего и его стандартного отклонения. Для сравнения численности клеток в разных вариантах экспериментальных растворов использовали метод дисперсионного анализа ANOVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытуемые концентрации металлов являются достаточно низкими. Так, в массовом выражении диапазон концентраций ионов меди составил 0,0004–0,000002 мг/л, тогда как норматив содержания меди для воды водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 1 мг/л. Моделирование загрязнения воды относительно небольшими концентрациями металлов было проведено намеренно: выбранные концентрации относятся к витальным, то есть таким, которые организмы способны длительно переносить. Именно такие уровни содержания меди свойственны большинству водных объектов, расположенных вне зоны добычи металлов и их переработки [22, 23].

На рисунке 1 представлены результаты биотестирования серий модельных растворов, содержащих Cu(II).

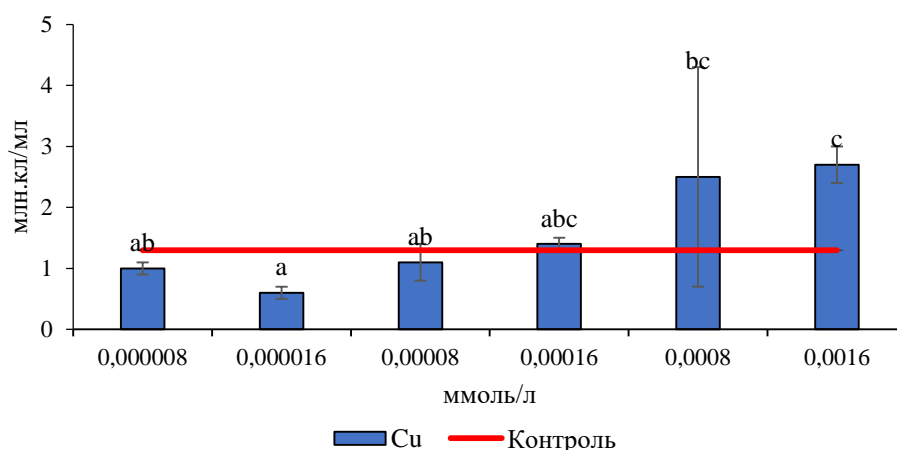


Рис. 1. Оценка реакции водоросли *S. quadricauda* на растворы, содержащие Cu(II) по сравнению с контролем. Разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия между вариантами ($p < 0,05$).

Fig. 1. Evaluation of the reaction of *S. quadricauda* algae to solutions containing Cu(II) compared with the control. The different letter indexes indicate significant differences between the variants ($p < 0.05$).

На представленной диаграмме (рис. 1) видим, что медь в диапазоне концентраций 0,000008–0,00008 ммоль/л не оказывала значимого влияния на численность клеток водорослей по сравнению с контролем. Далее наметилась тенденция к стимуляции *S. quadricauda*, которая в вариантах с максимальными тестируемыми концентрациями 0,008 и 0,0016 ммоль/л привела к достоверному увеличению численности клеток водорослей к контролю. Вероятно, дальнейшее увеличение концентрации растворов привело бы сначала к нарастанию гормезиса, поскольку в низких дозах медь выступает как эссенциальный микроэлемент, необходимый как растениям, так и животным [24]. Дальнейшее повышение концентрации Cu(II) в растворе неминуемо вызывает угнетение гидробионтов.

Показанное отсутствие реакции водорослей *S. quadricauda* на низкие концентрации металла в воде говорит о том, что до определенного порога (0,00008 ммоль/л) Cu(II) не изменяет биохимических процессов в клетках, а встраивается в обмен веществ фототрофов. Гормезис, который наблюдался при повышении концентрации, является начальной стадией стресса [25].

Реакция водорослей на эквимоллярные концентрации La(III) резко отличается от ситуации, описанной для меди (рис. 2).

Все тестируемые растворы с La(III) оказывали достоверное стимулирующее действие на размножение клеток водорослей в сравнении с контрольными данными. Увеличение количества клеток составило 4,2–11,1 раз. Причем, для первых четырех растворов отмечено закономерное возрастание уровня стимуляции с ростом концентрации лантана, затем наблюдается спад гормезиса. Можно предположить, что дальнейшее увеличение концентраций приведет к угнетению развития водорослей.

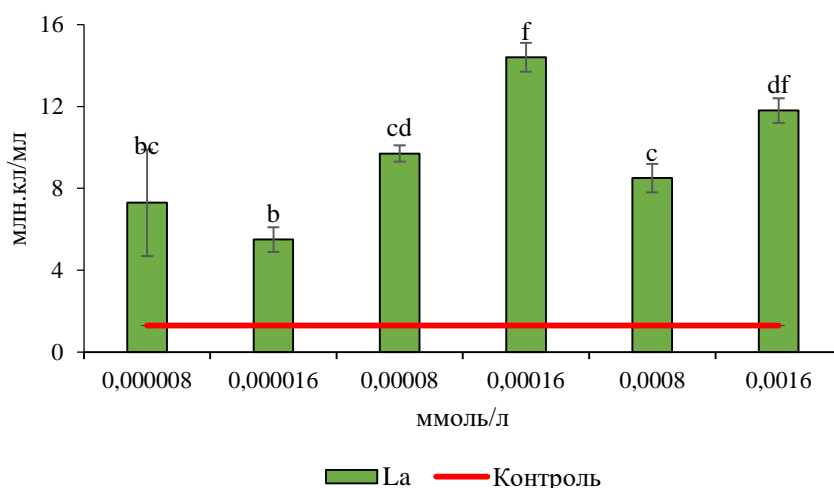


Рис. 2. Оценка реакции водоросли *S. quadricauda* на растворы, содержащие La(III) по сравнению с контролем. Разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия между вариантами ($p < 0,05$).

Fig. 2. Evaluation of the reaction of *S. quadricauda* algae to solutions containing La(III) compared with the control. The different letter indexes indicate significant differences between the variants ($p < 0.05$).

При совместном присутствии Cu(II) и La(III) в модельной водной среде гормезис также проявлялся, но был менее выражен, чем при индивидуальном действии La(III) (рис. 3).

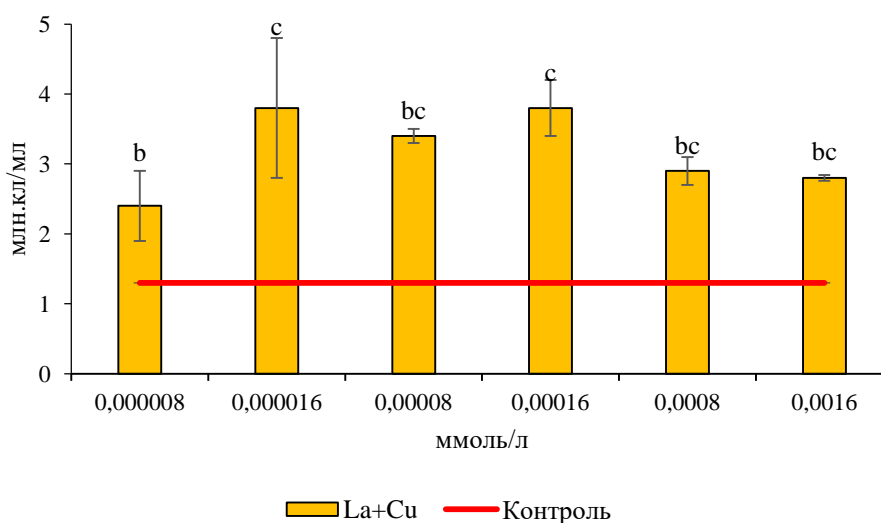


Рис. 3. Оценка реакции водоросли *S. quadricauda* на растворы, содержащие комбинацию Cu(II) и La(III) по сравнению с контролем. Разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия между вариантами ($p < 0,05$).

Fig. 3. Evaluation of the reaction of *S. quadricauda* algae to solutions containing Cu(II) and La(III) compared with the control. The different letter indexes indicate significant differences between the variants ($p < 0.05$).

В сравнении с контролем увеличение численности клеток водорослей составило 1,8–2,9 раз. Нарастание гормезиса наблюдается до варианта с концентрацией металлов 0,00016 ммоль/л, далее эффект снижается. В опыте с

максимальными исследуемыми концентрациями достоверных отличий от контроля уже не наблюдали.

Положительным фактом является то, что в данной серии опытов не выявлено потенцирования действия Cu(II) в присутствии La(III), как это было показано для *Daphnia magna* [26] и *Hyalella azteca* [27].

Таким образом, основной отличительной реакцией *S. quadricauda* на действие La(III) в диапазоне концентраций 0,000008–0,0016 ммоль/л является значительная стимуляция размножения клеток. Ранее другими исследователями было показано, что La(III) стимулирует рост и развитие высших растений [28, 29].

Эффект стимуляции, рассматриваемый для отдельного организма, часто воспринимается как положительное явление. На таких эффектах основана концепция ведения интенсивного сельского хозяйства с применением удобрений. Однако, на примере агроэкосистем известно, что стимуляция высших растений азотными удобрениями приводит к дистрофии почвенного микробиома, изменению структуры сообщества [30]. Для водных экосистем негативные последствия размножения зеленых водорослей известны. Это эвтрофикация водной среды. В настоящее время признаки эвтрофикации водоемов проявляются на фоне нормативных значений концентраций макроэлементов [31, 32]. Возможно, такие явления могут быть связаны с неучтенными микроэлементами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования воздействия La(III) на организмы различной систематической принадлежности продолжают оставаться актуальными. Появляется всё больше фактов о его нестандартных эффектах.

В проведённой работе показано, что La(III) в диапазоне концентраций 0,000008–0,0016 ммоль/л стимулирует нарастание клеток *S. quadricauda*, тогда как воздействие аналогичных концентраций Cu(II) практически не оказывало воздействия на водоросли. Сочетание Cu(II) и La(III) оказывало горметическое действие на тест-организмы за счет La(III) – пропорционально его присутствию в комбинированных растворах.

Закономерности воздействия на одноклеточные фототрофные организмы сопоставимы с известными данными о стимуляции лантаном высших растений.

С точки зрения экосистемы выявленные эффекты La(III) и его сочетания с Cu(II) означают, что эвтрофикацию водоемов могут вызывать не только минеральные удобрения, но и микроэлементы, активно вовлекаемые в биогеохимические круговороты антропогенной деятельностью.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Opere E.O., Struhs E., Mirkouei A. (2021). A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110917>.
2. Zhou B., Li Z., Chen C. (2017) Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7(11), 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>.
3. Ильин В.М., Боев Е.В., Исламутдинова А.А., Аминова Э.К. (2022). Разработка технологии применения наноструктурированных комплексов на основе тяжелых металлов в строительных растворах. *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*, 14(5), 398–404. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-398-404>.
4. Демидов А.М., Калмыков А.В., Косников Г.А., Каштанов А.Д. (2021). Применение металлотермии как способа получения композиционных алюминиевых сплавов. *Композиты и наноструктуры*, 13(1), 19–22. <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2021-13-1-19-22>.
5. Moeller T. (2013). *The chemistry of the lanthanides: Pergamon texts in inorganic chemistry*. Oxford: Elsevier. P. 35.
6. Лянгузова И.В. (2016). *Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России*. Саарбрюккен: LAP Lambert.
7. Янтурин С.М., Кужина Г.Ш., Боброва О.Б., Черчинцев В.Д. (2015). *Тяжелые металлы в компонентах эко-систем промышленных регионов с развитой металлургической промышленностью*. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
8. Колесников С.М., Вальков В.Ф., Казеев К.Ш. (2000). *Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами*. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южный федеральный университет.
9. Gwenzi W., Mupatsi N.M., Mtisi M., Mungazi A.A. (2021). Sources and health risks of rare earth elements in waters. *Water pollution and remediation: Heavy metals*, 1–36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52421-0_1.
10. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. (2015) Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements – knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, 115, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.030>.
11. Sysolyatina M.A., Olkova A.S. (2023). Sources of rare earth elements in the environment and their impact on living organisms. *Environmental reviews*, 31(2), 206–217. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0081>.
12. Takeno N (2005). Atlas of Eh-pH diagrams. Geological survey of Japan open file report No.419. <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf> (дата обращения: 01.02.2025)
13. Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A., Jin D., Gaertner D. (2008). Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption. *Chemical geology*, 247(1–2), 154–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.010>.
14. Marsac R., Davranche M, Gruau G., Dia A., Pédrot M., Le Coz-Bouhni M., Briant N. (2013). Effects of Fe competition on REE binding to humic acid: origin of REE pattern variability in organic waters. *Chemical geology*, 342, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.020>.
15. Millero F.J. (1992). Stability constants for the formation of rare earth inorganic complexes as a function of ionic strength. *Geochimica et cosmochimica acta*, 56(8), 3123–3132. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90293-R](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90293-R).
16. Ben Y., Cheng M., Liu Y., Wang L., Yang Q., Huang X., Zhou Q. (2023). The stimulatory effect and mechanism of low-dose lanthanum on soybean leaf cells. *Journal of hazardous materials*, 441, 129924. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129924>.

17. Iguchi S., Tokunaga T., Kamon E., Takenaka Y., Koshimizu S., Watanabe M., Ishimizu T. (2023). Lanthanum supplementation alleviates tomato root growth suppression under low light stress. *Plants*, 12(14), 2663. <https://doi.org/10.3390/plants12142663>.
18. Sharma P., Jha A.B., Dubey, R.S. (2024). Addressing lanthanum toxicity in plants: Sources, uptake, accumulation, and mitigation strategies. *Science of the total environment*, 929, 172560. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172560>.
19. Xu Q., Fu Y., Min H., Cai S., Sha S., Cheng G. (2012). Laboratory assessment of uptake and toxicity of lanthanum (La) in the leaves of *Hydrocharis dubia* (Bl.) *Backer*. *environmental science and pollution research*, 19, 3950–3958. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0982-1>.
20. Zilber L., Parlanti E., Fortin C. (2024). Impact of organic matter of different origins on lanthanum speciation, bioavailability and toxicity toward a green alga. *Frontiers in environmental chemistry*, 5, 1342500. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2024.1342500>.
21. ФР 1.39.2007.03223. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. Москва: Акварос, 2007. 47 с.
22. Даувальтер В.А., Слукровский З.И., Денисов Д.Б., Черепанов А.А. (2021). Особенности химического состава воды городских озер Мурманска. Вестник Санкт-Петербургского университета. *Науки о Земле*, 66(2), 252–266. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>.
23. Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Дружинина А.С., Зыков С.Б., Иванченко Н.Л. (2023). Сезонная динамика содержания тяжелых металлов и оценка загрязнения воды в реке Северная Двина (Архангельск). *Арктика: экология и экономика*, 13(2), 223–233. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-223-233>.
24. Климова Т.А., Барышева Е.С. (2017). Значение эссенциальных элементов в жизнедеятельности микроорганизмов. Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург: Оренбургский государственный университет. С. 1925–1929.
25. Ерофеева Е.А. Гормезис и парадоксальные эффекты у растений в условиях автотранспортного загрязнения и при действии поллютантов в эксперименте: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Нижний Новгород, 2017.
26. Sysolyatina M.A., Olkova A.S. (2023). Potentization of the toxic effect of copper in the presence of lanthanum in bioassays for *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). *Biology bulletin*, 50(10), 2677–2680. <https://doi.org/10.1134/S1062359023100163>.
27. Ложкина Р.А., Сысолятина М.А., Томилина И.И., Олькова А.С. (2024). Ответные реакции *Hyalella azteca* на действие лантана в условиях хронического эксперимента. *Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН*, 108(111), 47–57.
28. Yanjun R.E.N., Xuejun R.E.N., Jianjun M.A., Lijing Y.A.N. (2014). Effects of mixed rare earth fertilizer on yield and nutrient quality of leafy vegetables during different seasons. *Journal of rare Earths*, 34, 638–643. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60073-X).
29. Корвиго И.О., Першина Е.В., Иванова Е.А., Матюк Н.С., Савоськина О.А., Чирак Е.Л., Проворов Н.А., Андронов Е.Е. (2016). Оценка длительного воздействия агротехнических приемов и сельскохозяйственных культур на почвенные микробные сообщества. *Микробиология*, 85(2), 199–210. <https://doi.org/10.7868/S0026365616020117>.
30. Jia T., Gu J., Ma M., Song Y. (2024). Lanthanum significantly contributes to the growth of the fine roots' morphology and phosphorus uptake efficiency by increasing the yield and quality of *Glycyrrhiza uralensis*. *Taproots. Plants*, 13(4), 474. <https://doi.org/10.3390/plants13040474>.
31. Башкот Е.Н., Ижаев И.А-Ю. (2007). Оценка экологической ситуации на реках Тебердинского заповедника. *Теоретическая и прикладная экология*, 3, 39–43. <https://doi.org/110.25750/1995-4301-2007-3-039-043>.
32. Минченок Е.Е., Пахомова Н.А. (2016). Оценка состояния городских водных экосистем по гидробиологическим показателям. *Теоретическая и прикладная экология*, (3), 48–55. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2016-3-048-055>.

References:

1. Opare, E.O. Struhs, E., & Mirkouei, A. (2021). A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110917>.
2. Zhou, B. Li, Z., & Chen, C. (2017) Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7(11), 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>.
3. Ilin, V.M. Boev E.V., Islamutdinova A.A., & Aminova, E.K. (2022). Development of heavy metal-based nanostructured complex technology for use in building mortar. *Nanotechnologies in construction*, 14(5), 398–404. (in Russ). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-398-404>.
4. Demidov, A.I. Kalmykov, A.V., Kosnikov, G.A., & Kashtanov, A.D. (2021). Metallothermy as a method for producing aluminum-matrix composites. *Composites and nanostructures*, 13(1), 19–22. (in Russ). <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2021-13-1-19-22>.
5. Moeller, T. (2013). *The chemistry of the lanthanides: Pergamon texts in inorganic chemistry*. Oxford: Elsevier. P. 35.
6. Lyanguzova, I.V. (2016). *Heavy metals in northern taiga ecosystems of Russia*. Saarbrücken: LAP Lambert (in Russ.).
7. Yanturin, S.M. Kuzhina, G.S., Bobrova, O.B., & Cherchintsev, V.D. (2015). *Heavy metals in the components of ecosystems of industrial regions with developed metallurgical industry*. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (in Russ.).
8. Kolesnikov, S.M. Valkov, V.F., & Kazeev, K.Sh. (2000). *Ecological consequences of soil pollution with heavy metals*. Rostov-on-Don: North Caucasus Scientific Center of Higher Education of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education Southern Federal University. (in Russ).
9. Gwenzi, W. Mupatsi, N.M., Mtisi, M., & Mungazi, A.A. (2021). Sources and health risks of rare earth elements in waters. *Water pollution and remediation: Heavy metals*, 1–36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52421-0_1.
10. Pagano, G. Guida, M., Tommasi, F., & Oral, R. (2015) Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements – knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, 115, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.030>.
11. Sysolyatina, M.A. & Olkova, A.S. (2023). Sources of rare earth elements in the environment and their impact on living organisms. *Environmental reviews*, 31(2), 206–217. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0081>.
12. Takeno, N (2005). Atlas of Eh-pH diagrams. Geological survey of Japan open file report No.419. <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf> (дата обращения: 01.02.2025)
13. Davranche, M. Pourret, O., Gruau, G., Dia, A., Jin, D., & Gaertner, D. (2008). Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption. *Chemical geology*, 247(1–2), 154–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.010>.
14. Marsac, R. Davranche, M, Gruau, G., Dia, A., Pédrot, M., Le Coz-Bouhni, M., & Briant, N. (2013). Effects of Fe competition on REE binding to humic acid: origin of REE pattern variability in organic waters. *Chemical geology*, 342, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.020>.
15. Millero, F.J. (1992). Stability constants for the formation of rare earth inorganic complexes as a function of ionic strength. *Geochimica et cosmochimica acta*, 56(8), 3123–3132. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90293-R](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90293-R).
16. Ben, Y. Cheng, M., Liu, Y., Wang, L., Yang, Q., Huang, X., & Zhou, Q. (2023). The stimulatory effect and mechanism of low-dose lanthanum on soybean leaf cells. *Journal of hazardous materials*, 441, 129924. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129924>.

17. Iguchi, S. Tokunaga, T., Kamon, E., Takenaka, Y., Koshimizu, S., Watanabe, M., & Ishimizu, T. (2023). Lanthanum supplementation alleviates tomato root growth suppression under low light stress. *Plants*, 12(14), 2663. <https://doi.org/10.3390/plants12142663>.
18. Sharma, P. Jha, A.B., & Dubey, R.S. (2024). Addressing lanthanum toxicity in plants: Sources, uptake, accumulation, and mitigation strategies. *Science of the total environment*, 929, 172560. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172560>.
19. Xu, Q. Fu, Y., Min, H., Cai, S., Sha, S., & Cheng, G. (2012). Laboratory assessment of uptake and toxicity of lanthanum (La) in the leaves of *Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer. *environmental science and pollution research*, 19, 3950–3958. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0982-1>.
20. Zilber, L. Parlanti, E., & Fortin, C. (2024). Impact of organic matter of different origins on lanthanum speciation, bioavailability and toxicity toward a green alga. *Frontiers in environmental chemistry*, 5, 1342500. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2024.1342500>.
21. FR 1.39.2007.03223. Biological methods of control. Methodology for determination of toxicity of waters, aqueous extracts from soils, sewage sludge and wastes by changes in chlorophyll fluorescence level and number of algae cells. Moscow: Akvaros, 2007. 47 p. (in Russ.).
22. Dauvalter, V.A. Slukovsky, Z.I., Denisov, D.B., & Cherepanov, A.A. (2021). Features of the chemical composition of water in the urban lakes of Murmansk. *Vestnik of Saint Petersburg university. Earth sciences*, 66(2), 252–266. (in Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>.
23. Yakovlev, E.Y. Druzhinin, S.V., Druzhinina, A.S., Zykov, S.B., & Ivanchenko, N.L. (2023). Seasonal dynamics of heavy metals content and assessment of water pollution in the northern dvina river (Arkhangelsk). *Arctic: Ecology and Economy*, 13(2), 223–233. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-223-233> (in Russ.).
24. Klimova, T.A. & Barysheva, E.S. (2017). The importance of essential elements in the vital activity of microorganisms. *University complex as a regional center of education, Science and Culture. Proceedings of the all-Russian scientific and methodological conference*. Orenburg: Orenburg State University. P. 1925–1929. (in Russ.).
25. Erofeeva, E.A. (2017). *Hormesis and paradoxical effects in plants under conditions of motor vehicle pollution and under the influence of pollutants in an experiment* (Ph.D. dissertation). Nizhny Novgorod (in Russ.).
26. Sysolyatina, M.A. & Olkova, A.S. (2023). Potentization of the toxic effect of copper in the presence of lanthanum in bioassays for *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). *Biology bulletin*, 50(10), 2677–2680. <https://doi.org/10.1134/S1062359023100163>.
27. Lozhkina, R.A. Sysolyatina, M.A., Tomilina, I.I., & Olkova, A.S. (2024). Responses of *Hyaella azteca* to the action of lanthanum under conditions of a chronic experiment. *Transactions of the Papanin Institute for Biology of inland waters RAS*, 108(111), 47–57. (in Russ.).
28. Yanjun, R.E.N. Xuejun, R.E.N., Jianjun, M.A., & Lijing, Y.A.N. (2014). Effects of mixed rare earth fertilizer on yield and nutrient quality of leafy vegetables during different seasons. *Journal of rare Earths*, 34, 638–643. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60073-X).
29. Korvigo, I.O. Pershina, E.V., Ivanova, E.A., Chirak, E.L., Provorov, N.A., Andronov, E.E., Matyuk, N.S., & Savos'kina, O.A. (2016). Effect of long-term application of agrotechnical techniques and crops on soil microbial communities. *Microbiology*, 85(2), 199–210. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0026365616020117>.
30. Jia, T. Gu, J., Ma, M., & Song, Y. (2024). Lanthanum significantly contributes to the growth of the fine roots' morphology and phosphorus uptake efficiency by increasing the yield and quality of *Glycyrrhiza uralensis*. *Taproots*. *Plants*, 13(4), 474. <https://doi.org/10.3390/plants13040474>.
31. Bashkot, E.N. & Izhaev I.A (2007). Estimation of the ecological situation on the rivers of the Teberda reserve. *Theoretical and applied ecology*, 3, 39–43. (in Russ). <https://doi.org/110.25750/1995-4301-2007-3-039-043>.
32. Minchenok, E.E. & Pakhomova, N.A. (2016). Assessment of urban water ecosystems using hydrobiological indicator. *Theoretical and applied ecology*, 3, 48–55. (in Russ). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2016-3-048-055>.