



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2022.1.21012

Оценка токсичности редкоземельных элементов La и Ce по ответным реакциям цианобактерий**М. А. Сысолятина¹, А. С. Олькова¹✉, Е. В. Коваль²**

¹Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская область, Россия,
e-mail: usr08617@vyatsu.ru

²Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия

Поступила в редакцию: 02.04.2022 г.; после доработки: 13.05.2022 г.; принята в печать: 16.05.2022 г.

Аннотация – Для объективной оценки экологического состояния окружающей среды необходимо иметь достоверную информацию о наиболее чувствительных тест-организмах к определенным веществам. В настоящее время редкоземельные элементы (РЗЭ) становятся все более востребованными в высокотехнологичных отраслях промышленности, при этом для них не разработаны санитарные и природоохранные нормативы. Исходя из этих позиций, целью нашей работы было сравнение чувствительности трех видов цианобактерий (ЦБ) к низким дозам La^{3+} и Ce^{3+} . Проводили биотестирование растворов сульфатов La и Ce по реакциям *Nostoc muscorum* Ag., *Nostoc paludosum* Kütz. и *Nostoc linckia* (Roth.) Born and Flah. Расчетные концентрации La^{3+} и Ce^{3+} были равны 0,0001 и 0,001 мг/л. Установлено, что по содержанию хлорофилла *a* и концентрации малонового диальдегида (МДА) чувствительность цианобактерий к РЗЭ убывает в следующем ряду: *N. linckia* > *N. paludosum* > *N. muscorum*. У наиболее чувствительного вида *N. linckia* в растворе «0,001 мг/л La^{3+} » зафиксировано снижение количества хлорофилла *a* в 4,2 раза по сравнению с контролем, а также одновременное возрастание уровня МДА в 2,2 раза. Показано, что ЦБ *N. linckia* демонстрирует классическую картину окислительного стресса в ответ на действие ионов La^{3+} и Ce^{3+} . Этот тест-организм можно рекомендовать для биомониторинга водных объектов, подверженных потенциальному влиянию РЗЭ.

Ключевые слова: Лантан, церий, биотестирование, цианобактерии, окислительный стресс.

Monitoring soil, air, water status

UDC 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2022.1.21012

Evaluation of the toxicity of the rare-earth elements La and Ce on the responses of cyanobacteria**Maria A. Sysolyatina¹, Anna S. Olkova¹✉, Ekaterina V. Koval²**

¹Vyatka State University, Vyatka, Kirov region, Russia
e-mail: usr08617@vyatsu.ru

²Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

Abstract – Reliable information about the most sensitive test organisms to pollutants is necessary for an objective assessment of the ecological state of the environment. Currently, rare earth elements (REE) are in demand in high-tech industries, but they do not have sanitary and environmental impact standards. Based on these positions, the aim of our work was to compare the sensitivity of three species of cyanobacteria (CB) to low doses of La^{3+} and Ce^{3+} . We have carried out bioassay of La and Ce sulfate solutions according to the reactions of *Nostoc muscorum* Ag., *Nostoc paludosum* Kütz. and *Nostoc linckia* (Roth.) Born and Flah. The calculated concentrations of La^{3+} and Ce^{3+} were 0.0001 and 0.001 mg/l. We found that, according to the content of chlorophyll a and the concentration of malondialdehyde (MDA), the sensitivity of cyanobacteria to REE decreases in the following order: *N. linckia* > *N. paludosum* > *N. muscorum*. In the most sensitive species *N. linckia* in a solution of "0.001 mg/l La^{3+} " chlorophyll a was reduced by 4.2 times, and MDA increased by 2.2 times compared with the control. Thus, the *N. linckia* demonstrated the classical pattern of oxidative stress in response to the action of La^{3+} and Ce^{3+} ions. This test organism can be recommended for biomonitoring of water bodies potentially affected by REE.

Keywords: Lanthanum, cerium, bioassay, cyanobacteria, oxidative stress.

ВВЕДЕНИЕ

Поступление в окружающую среду мощного потока поллютантов, их тесного контакта с живыми организмами, вынуждают научное сообщество искать методы и виды организмов, способные диагностировать уровень токсичности загрязняющих веществ. С этой позиции интерес представляют цианобактерии (ЦБ), обладающие высоким адаптационным, биоремедиационным потенциалом, а также широким спектром направлений биотехнологического использования [1–3].

Цианобактерии – граммотрицательные фотосинтезирующие азотфиксаторы, которые в естественных условиях придают устойчивость экосистемам [4]. Показано, что в ответ на действие различных токсикантов в клетках ЦБ происходят функциональные изменения на субклеточном и клеточном уровнях [5–6]: изменение количества хлорофилла *a* в клетках [7], изменение биохемилюминесценции [8] и активности перекисного окисления липидов – показателя стресса и реакции на загрязнение среды обитания [9]. Такое разнообразие предлетальных высокочувствительных ответных реакций ЦБ дает возможность их использования для целей биотестирования в качестве тест-организмов.

В ряде исследований показана высокая чувствительность ЦБ к действию тяжелых металлов (ТМ), фосфорорганических поллютантов, пестицидов [5, 10]. В настоящее время многие высокотехнологичные производства используют редкоземельные элементы (РЗЭ). Такие производства и их отходы являются источниками РЗЭ в окружающей среде [11]. Нормативы содержания РЗЭ в компонентах окружающей среды до сих пор не разработаны [12], поэтому весьма актуальным является поиск биологических видов, способных диагностировать загрязнение водных сред РЗЭ.

Целью нашей работы было сравнение чувствительности трех видов цианобактерий к низким дозам лантана и церия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для моделирования загрязнения водной среды мы использовали сульфат лантана $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и сульфат церия $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Добавки солей вносились в дистиллированную воду до достижения концентраций действующих ионов 0,0001 и 0,001 мг/л. Исследуемые концентрации моделировали сверхмалое загрязнение. При этом мы ориентировались на опубликованные данные о влиянии сульфата лантана на выживаемость, продолжительность жизни, рост, развитие, плодовитость рачков *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg в диапазоне доз от 0,16 до 3,53 мкг La/л [13].

Тест-организмами были *Nostoc muscorum* Ag., *Nostoc paludosum* Kütz, и *Nostoc linckia* (Roth) Vorn. et Flah. Использовали альгологически чистые культуры ЦБ, которые выращивали при постоянном освещении (3000 люкс) и температуре (+25 °С) на жидкой среде Громова №6 без азота. Микроорганизмы использовали в фазу экспоненциального роста, что определяли по титру клеток методом прямого счета в камере Горяева (in the Goryaev chamber): *N. linckia* – $1,7 \cdot 10^7$ кл./мл, *N. paludosum* – $1,2 \cdot 10^7$ кл./мл, *N. muscorum* – $2,7 \cdot 10^7$ кл./мл [14], возраст культур – 5 недель.

Для биотестирования культуру ЦБ гомогенизировали, затем помещали в растворы токсикантов на 24 часа. Контроль (0) – дистиллированная вода. Токсичность модельных растворов оценивали по изменениям биохимических показателей ЦБ: содержанию хлорофилла *a* и интенсивности процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ). Содержание хлорофилла *a* определяли в гомогенате ЦБ спектрофотометрическим методом на приборе Specol 1300 (Германия) [15]. Интенсивность процессов ПОЛ анализировали по цветной реакции тиобарбитуровой кислоты с малоновым диальдегидом (МДА) – основным продуктом процессов окисления липидов. За основу была взята методика спектрофотометрического определения интенсивности процессов ПОЛ в растительных тканях [16], адаптированная нами для работы с ЦБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице отражены биохимические ответные реакции ЦБ на воздействие солей La и Ce.

Цианобактерия *N. muscorum* оказалась устойчивой к загрязнению тестируемой среды солями лантана и церия при их добавках равных 0,0001 и 0,001 мг/л (в расчете на действующие ионы). Отличия концентрации хлорофилла *a* от контрольных данных были недостоверны ($p > 0,05$). Тенденция накопления в клетках МДА на фоне стабильного уровня хлорофилла *a* свидетельствует о том, что культура *N. muscorum* испытывает стрессовые воздействия [17–18], но при этом, вероятно, антиоксидантная система ЦБ активно подавляет разрушительное действие свободных радикалов и ингибирует окислительные процессы [19–20].

Реакция тест-организмов *N. paludosum* на РЗЭ проявлялась сильнее, однако не всегда закономерно. В опытах с добавками соли церия более низкая доза вещества (0,0001 мг/л) приводила к снижению концентрации хлорофилла *a* ($p < 0,05$) в 1,5 раза по сравнению с контролем, а реакция на увеличенную дозу

была на уровне с контрольными значениями ($p > 0,05$). Лантан действовал сильнее, его добавка равная 0,001 мг/л приводила к уменьшению концентрации хлорофилла *a* в клетках *N. paludosum* в 2,3 раза по сравнению с контролем ($p < 0,05$). Достоверных различий концентрации МДА в вариантах опыта с лантаном выявлено не было. Этот факт может свидетельствовать о том, что низкие дозы РЗЭ, действуют как эссенциальные микроэлементы, встраиваются в естественные обменные процессы, возможно в качестве коферментов-антиоксидантов и способствуют ингибированию интенсивности окислительного стресса [21–22].

Таблица. Ответные реакции ЦБ на воздействие La^{3+} и Ce^{3+}

Table. Responses of cyanobacteria to the impact of La^{3+} and Ce^{3+}

Показатель	Вариант, мг/л				
	Контроль	Концентрация La^{3+}		Концентрация Ce^{3+}	
		0,0001	0,001	0,0001	0,001
<i>Nostoc muscorum</i>					
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/мл	3,32±0,50	4,54±0,67*	4,65±0,69*	3,32±0,50	4,21±0,58
Содержание малонового диальдегида, нмоль/мл	0,19±0,02	0,12±0,03	0,27±0,05*	0,208±0,03	0,38±0,08*
<i>Nostoc paludosum</i>					
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/мл	5,65±0,65	7,3±0,7*	2,49±0,3*	3,65±0,25*	6,48±0,8
Содержание малонового диальдегида, нмоль/мл	0,48±0,10	0,47±0,11	0,47±0,08	0,45±0,07	0,33±0,01*
<i>Nostoc linckia</i>					
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/мл	10,80±1,33	5,02±0,71*	2,55±0,15*	1,72±0,08*	4,27±0,08*
Содержание малонового диальдегида, нмоль/мл	0,23±0,01	0,12±0,01*	0,50±0,10*	0,05±0,01*	0,23±0,07*

* – Различия статистически достоверны ($p \leq 0,05$)

Цианобактерия *N. linckia* оказалась наиболее чувствительной к низким дозам La и Ce. Уровень хлорофилла *a* во всех опытных вариантах был достоверно ниже, чем в контрольных вариантах ($p < 0,05$). В опытах с добавками соли церия реакция на меньшую дозу токсиканта оказалась более выраженной, чем на увеличенную дозу (0,001 мг/л), что проявилось в снижении содержания хлорофилла *a* в 6,3 раза от уровня контроля. Такие парадоксальные эффекты часто встречаются при исследовании действия низких доз веществ [23]. Реакция *N. linckia* на загрязнение воды сульфатом лантана демонстрировала значительный дистресс организмов. Было отмечено снижение концентрации хлорофилла *a* в 2,2 и 4,2 раза при воздействии 0,0001 и 0,001 мг/л La^{3+} соответственно. При повышенной концентрации лантана (0,001 мг/л) мы одновременно зафиксировали резкое увеличение концентрации МДА в клетках ЦБ. Уменьшение содержания хлорофилла *a* может быть следствием активации окислительных процессов, в ходе которых происходит дегградация молекул хлорофилла, а также инактивация ферментов биосинтеза пигментов.

Полученные данные согласуются с результатами исследований, полученных нами ранее. ЦБ *N. linckia* была более чувствительной к действию Лигногумата – гуминового препарата с высоким содержанием солей гуминовых кислот, используемому в сельском хозяйстве [24]. Однако к действию фосфорсодержащих токсикантов (метилфосфоновой кислоте и гербициду Глифосат) *N. linckia* проявляет наибольшую устойчивость по сравнению с *N. muscorum* и *N. paludosum*. Кроме того, ЦБ *N. linckia* чувствительна к действию некоторых ТМ, например, меди, что проявляется в активации образования каталазы, снижению биохемолюминесценции и жизнеспособности в 40 раз [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в проведенном исследовании нами показано, что цианобактерия *N. linckia* обладает повышенной чувствительностью к загрязнению водных сред редкоземельными металлами (Ce и La) по сравнению с *Nostoc muscorum* и *Nostoc paludosum*. Ценность использования *N. linckia* в качестве тест-организма заключается в реакциях на низкие дозы загрязнения – 0,0001 и 0,001 мг/л в расчете на ионы Ce^{3+} и La^{3+} .

В целом, полученные данные демонстрируют, что систематически близкие организмы могут отличаться друг от друга чувствительностью к токсикантам. Реакции на химические факторы формировались у каждого вида специфично, в соответствии с его трофическими особенностями, биоритмами, месте в экосистеме и множеством других экологически и эволюционно значимых параметров. С биохимической точки зрения причинами межвидовых различий в восприимчивости к токсикантам чаще всего являются особенности в структурах белков и содержание жира в организме [25–26]. Полученные нами результаты и указанные данные подтверждают необходимость выбора наиболее чувствительных тест-организмов, в том числе из числа систематически и эволюционно близких видов организмов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Vonshak, A. (2002). *Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology, and biotechnology*; Editor A. Vonshak, Taylor & Francis Ltd: London, UK.
2. Klanchui, A., & Cheevadhanarak, S., Prommeenate P., & Meechai A. (2017). Exploring Components of the CO₂-Concentrating mechanism in alkaliphilic cyanobacteria Through Genome-Based analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 15, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2017.05.001>
3. Dittmann, E., & Gugger, M., Sivonen, K., & Fewer, D.P. (2015). Natural product biosynthetic diversity and comparative genomics of the cyanobacteria. *Trends Microbiol*, 23(10), 642–652. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.07.008>

4. Chakdar, H., & Jadhav, S.D., Dhar, D.W., & Pabbi, S. (2012). Potential application of blue green algae. *J. Scientific and Industrial Research*, 71, 13–20.
5. Fokina, A.I., & Ogorodnikova, S.YU., Domracheva, L.I., Lyalina, E.I., Gornostaeva, E.A., Ashikhmina, T.YA., & Kondakova, L.V. (2017). Cyanobacteria as Test Organisms and Biosorbents. *Eurasian Soil Science*, 50(1), 70–77. <https://doi.org/10.1134/S106422931611003X>
6. Коваль Е.В., Рычкова Н.С., Огородникова С.Ю. (2018). Эффекты воздействия карбофоса на цианобактерии. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». Киров. С. 188–192. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36586112>
7. Castenholz, R.W. (2015). General characteristics of the cyanobacteria. *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*, 1–23. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.cbm00019>
8. Scheerer, S.T. (2008). *Microbial biodeterioration of outdoor stone monuments. Assessment methods and control strategies*. The thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D. dissertation), UK, Cardiff: Cardiff University.
9. Barylа, A., & Laborde, C., Montillet, J.-L., Triantaphylides, A., & Chagvardie, P. (2000). Evaluation of lipid peroxidation as a toxicity bioassay for plants exposed to copper. *Environmental Pollution*, 109(1), 131–135. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00232-8)
10. Коньшева Е.Н., Коротченко И.С. (2011). Влияние тяжелых металлов и их детоксикантов на ферментативную активность почв. *Вестник КрасГАУ*, 1, 114–119.
11. Dang, D.H., & Zhang, Z.R. (2020). Hazardous motherboards: Changes in metal contamination related to the evolution of electronic technologies. *Environmental pollution*, 268(B), 115731. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115731>
12. Itoh, A., & Yaida, A, Zhu, Y. (2021). Potential Anthropogenic Pollution of High-technology Metals with a Focus on Rare Earth Elements in Environmental Water. *Analytical sciences*, 1(37), 20SAR16. <http://dx.doi.org/10.2116/analsci.20SAR16>.
13. Ложкина Р.А., Томилина И.И. (2016). Влияние лантана на биологические параметры ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia affinis* в хроническом эксперименте. *Токсикологический вестник*, 1(136), 42–46. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-1-42-42>
14. Muntyan, M.S., Morozov, D.A., Klishin, S.S., Khitrin, N.V., & Kolomijtseva, G.YA. (2012). Evaluation of the electrical potential on the membrane of the extremely alkaliphilic bacterium Thioalkalivibrio. *Biochemistry*, 77(8), 1113. <https://doi.org/10.1134/S0006297912080135>
15. Aminot, A., & Rey, F. (2000). Standard procedure for the determination of chlorophyll a by spectroscopic methods. *International Council for the Exploration of the Sea*, 112, 25.
16. Лукаткин А.С. (2002). *Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс*. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та.
17. Veronesi, C., Rickaner, M., Fournier, J., Pouenat, M.-L., & Esquerre-tugaye, M.-T. (1996). Lipoxygenase gene expression in the Tobacco-Phytophthora parasitica nicotianae interaction. *Plant Physiol*, 112(3), 997–1004. <https://doi.org/10.1104/pp.112.3.997>
18. El-beltagi, H.S., & Mohamed, H.I. (2013). Reactive Oxygen Species, Lipid Peroxidation and Antioxidative Defense Mechanism. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 41(1): 44–57. <https://doi.org/10.15835/nbha4118929>
19. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405–410. [http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9).
20. Shao, H.B., Chu, L.YE., Lu, Zh.H., & Kang, C.M. (2008). Primary antioxidant free radical scavenging and redox signaling pathways in higher plant cells. *International Journal of Biological Sciences*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.7150/ijbs.4.8>
21. *Trace Elements*. National Research Council (US) Committee on Diet and Health. (1989). Diet and Health: Implications for Reducing Chronic Disease Risk. Washington (DC), USA: National Academies Press.
22. Dkhil, M.A., Zrieq, R., Al-quraishy, S., & Abdel Moneim A.E. (2016). Selenium nanoparticles attenuate oxidative stress and testicular damage in streptozotocin-induced diabetic rats. *Molecules*, 21(11), 1517. <https://doi.org/10.3390/molecules21111517>

23. Erofeeva E.A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, 12 (1): 121–135. <https://doi.org/10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva>
24. Коваль Е.В., Огородникова С.Ю. (2021). Влияние цианобактерий и лигногумата на рост и биохимические показатели растений ячменя. *Агрoхимия*, 6, 65–72.
25. Kutsenko, S.A. (2004). *Fundamentals of toxicology*. Foliant: St. Petersburg, Russia.
26. Brinkmann, M., Preuss, T.G., & Hollert, H. (2017). *Advances in Biochemical Engineering-Biotechnology. In Vitro Environmental Toxicology – Concepts, Application and Assessment*; Ed. by G. Reifferscheid, S. Buchinger; 1st ed.; Cham: Springer International Publishing, Switzerland, 157, 293–317.

References

1. Vonshak, A. (2002). *Spirulina platensis* (Arthrospira): physiology, cell-biology, and biotechnology; Editor A. Vonshak, Taylor & Francis Ltd: London, UK.
2. Klanchui, A., Cheevadhanarak, S., Prommeenate P., & Meechai A. (2017). Exploring Components of the CO₂-Concentrating mechanism in alkaliphilic cyanobacteria Through Genome-Based analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 15, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2017.05.001>
3. Dittmann, E., Gugger, M., Sivonen, K., & Fewer, D.P. (2015). Natural product biosynthetic diversity and comparative genomics of the cyanobacteria. *Trends Microbiol*, 23(10), 642–652. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.07.008>
4. Chakdar, H., Jadhav, S.D., Dhar, D.W., & Pabbi, S. (2012). Potential application of blue green algae. *J. Scientific and Industrial Research*, 71, 13–20.
5. Fokina, A.I., Ogorodnikova, S.YU., Domracheva, L.I., Lyalina, E.I., Gornostaeva, E.A., Ashikhmina, T.YA., & Kondakova, L.V. (2017). Cyanobacteria as Test Organisms and Biosorbents. *Eurasian Soil Science*, 50(1), 70–77. <https://doi.org/10.1134/S106422931611003X>
6. Koval E.V., Rychkova N.S., & Ogorodnikova S.YU. The effects of karbofos on cyanobacteria. Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Proceedings of the XVI All-Russian scientific and practical conference with international participation, Kirov. 2018. P. 188–192 (In Russ.).
7. Castenholz, R.W. (2015). General characteristics of the cyanobacteria. *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*, 1–23. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.cbm00019>
8. Scheerer, S.T. (2008). *Microbial biodeterioration of outdoor stone monuments. Assessment methods and control strategies*. The thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D. dissertation), UK, Cardiff: Cardiff University.
9. Baryla, A., Laborde, C., Montillet, J.-L., Triantaphylides, A., & Chagvardie, P. (2000). Evaluation of lipid peroxidation as a toxicity bioassay for plants exposed to copper. *Environmental Pollution*, 109(1), 131–135. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00232-8)
10. Konyshva E.N., & Korotchenko I.S. (2011). Influence of heavy metals and their detoxicants on enzymatic activity of soil. *Vestn. Krasn. Gos. Agrar. Univ. I*. 114.
11. Dang, D.H., & Zhang, Z.R. (2020). Hazardous motherboards: Changes in metal contamination related to the evolution of electronic technologies. *Environmental pollution*, 268(B), 115731. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115731>.
12. Itoh, A, Yaida, A, & Zhu, Y. (2021). Potential Anthropogenic Pollution of High-technology Metals with a Focus on Rare Earth Elements in Environmental Water. *Analytical sciences*, 1(37), 20SAR16. <http://dx.doi.org/10.2116/analsci.20SAR16>.
13. Lozhkina R.A., & Tomilina I.I. (2016). The effect of lanthanum on biological parameters of crustaceans *Ceriodaphnia affinis* lilljeborg in chronic experiments. *Toxicological Review*. 1(136), 42–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-1-42-42>

14. Muntyan, M.S., Morozov, D.A., Klishin, S.S., Khitrin, N.V., & Kolomijtseva, G.YA. (2012). Evaluation of the electrical potential on the membrane of the extremely alkaliphilic bacterium *Thioalkalivibrio*. *Biochemistry*, 77(8), 1113. <https://doi.org/10.1134/S0006297912080135>
15. Aminot, A., & Rey, F. (2000). Standard procedure for the determination of chlorophyll a by spectroscopic methods. *International Council for the Exploration of the Sea*, 112, 25.
16. Lukatkin A.S. (2002). *Cold damage to heat-loving plants and oxidative stress*. Publishing house of Mordov. University: Saransk, Russia, (In Russ.).
17. Veronesi, C., Rickaner, M., Fournier, J., & Pouenat, M.-L., Esquerre-tugaye, M.-T. (1996). Lipoxygenase gene expression in the Tobacco-Phytophthora parasitica nicotianae interaction. *Plant Physiol*, 112(3), 997–1004. <https://doi.org/10.1104/pp.112.3.997>
18. El-beltagi, H.S., & Mohamed, H.I. (2013). Reactive Oxygen Species, Lipid Peroxidation and Antioxidative Defense Mechanism. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 41(1): 44–57 <https://doi.org/10.15835/nbha4118929>
19. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7 (9), 405–410. [http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)
20. Shao, H.B., Chu, L.YE., Lu, Zh.H, & Kang, C.M. (2008). Primary antioxidant free radical scavenging and redox signaling pathways in higher plant cells. *International Journal of Biological Sciences*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.7150/ijbs.4.8>
21. *Trace Elements*. National Research Council (US) Committee on Diet and Health. (1989). Diet and Health: Implications for Reducing Chronic Disease Risk. National Academies Press: Washington (DC), USA.
22. Dkhil, M.A., & Zrieq, R., Al-quraishy, S., Abdel Moneim A.E. (2016). Selenium nanoparticles attenuate oxidative stress and testicular damage in streptozotocin-induced diabetic rats. *Molecules*, 21(11), 1517. <https://doi.org/10.3390/molecules21111517>
23. Erofeeva E.A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, 12(1), 121–135. <https://doi.org/10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva>
24. Koval E.V., & Ogorodnikova S.Yu. (2021). Study of the influence of cyanobacteria and Lignogumate on the life activity of barley. *Agrochemistry*, 6(60), 65–72 (In Russ.).
25. Kutsenko, S.A. (2004). *Fundamentals of toxicology*. Foliant: St. Petersburg, Russia.
26. Brinkmann, M., Preuss, T.G., & Hollert, H. (2017). *Advances in Biochemical Engineering-Biotechnology. In Vitro Environmental Toxicology – Concepts, Application and Assessment*; Ed. by G. Reifferscheid, S. Buchinger; 1rd ed.; Cham: Springer International Publishing, Switzerland, 157, 293–317.