

Identification of toxin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Kirov region and assessment of their relationship with water toxicity to hydrobionts

Short communication
LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Sysolyatina M.A.¹, Sidelev S.I.², Kut'yavina T.I.^{1*}

¹ Vyatka State University, Moskovskaya Str., 36, Kirov, 610000, Russia

² P.G. Demidov Yaroslavl State University, Sovetskaya Str., 14, Yaroslavl, 150003, Russia

ABSTRACT. Molecular genetic methods of analysis were used for the first time detection of cyanotoxin biosynthesis genes (microcystin, cylindrospermopsin, anatoxin-a, and saxitoxins) in organisms inhabiting the two largest water reservoirs of Kirov region (Belokholunitsky and Omutninsky) located in the northeast of the Russian Plain in the southern taiga subzone. The *mcyE* gene responsible for microcystin production was detected in all phytoplankton samples, and the *anaC* gene responsible for anatoxin-a production was detected in the most samples. 14 cyanobacteria taxa were found in the phytoplankton of the studied reservoirs. *Microcystis* and *Dolichospermum* are the most probable microcystin producers. The most probable anatoxin-a producers in Belokholunitsky reservoir are *Aphanizomenon flos-aquae* and *Dolichospermum planctonicum*, and in Omutninsky reservoir – *Cuspidothrix issatschenkoi* and *Dolichospermum flos-aquae*. Water from the studied reservoirs had an acute toxic effect on luminescent bacteria *Escherichia coli* (“Ecolum” test system) and protozoa *Paramecium caudatum* Ehrenberg, but was non-toxic to Entomostracans *Daphnia magna* Straus.

Keywords: algae bloom, cyanotoxin, bioassay, toxicity

For citation: Sysolyatina M.A., Sidelev S.I., Kut'yavina T.I. Identification of toxin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Kirov region and assessment of their relationship with water toxicity to hydrobionts // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 1109-1114. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1109

1. Introduction

Cyanobacterial “blooms” of water increasingly become a problem for water supply, fishing, recreational and touristic use of water bodies (Paerl and Otten, 2018; Voyakina et al., 2020; Bondarenko et al., 2021). Toxins produced by some cyanobacteria species are thought to cause various allergic reactions and may be associated with human diseases such as amyotrophic lateral sclerosis, Alzheimer’s disease, Parkinson’s disease, and others (Sini et al., 2021). In this regard, the identification of toxigenic cyanobacteria in water bodies and the search for ways to regulate their numbers is an urgent area of present scientific research. The aim of our work was to identify toxin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Kirov region using molecular genetic analysis, and to assess the relationship between cyanobacteria and water toxicity for hydrobionts.

2. Materials and methods

The objects of the study were two channel reservoirs (Belokholunitsky and Omutninsky) located in the northeast of the Russian Plain in the southern taiga subzone. Both reservoirs are beta-mesosaprobic according to the classification of waters by tropho-saprobic indicators, adopted in GOST 17.1.2.04-77, as well as they are eutrophic according to the value of the trophic state index (Neverova-Dziopak et al., 2012).

Water samples for phytoplankton studies were collected by scooping water from the surface (0–30 cm depth) of water bodies in August 2023. Cyanobacteria (CB) species identification was carried out by direct microscopy using a laboratory microscope Mikmed-6 variant 7 (Russia) and identifiers. Species names are given according to <https://www.algaebase.org/> (date of access: 03.06.2024).

*Corresponding author.

E-mail address: kutyavinati@gmail.com (T.I. Kut'yavina)

Received: June 24, 2024; **Accepted:** July 12, 2024;

Available online: August 30, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



For DNA extraction and polymerase chain reaction (PCR) phytoplankton samples were concentrated on MFAS-OS-2 membrane filters with 0.45 µm pore diameter (Vladipor, Russia). The search for cyanotoxin (microcystin (MC), cylindrospermopsin (CYN), anatoxin-a (AN-a) and saxitoxin (STX)) biosynthesis genes was performed by classic PCR using specific primers according to the previously described methodology (Sidelev and Babanazarova, 2020).

Water toxicity was determined using three laboratory test objects belonging to different trophic levels according to certified measurement methods: luminescent bacteria *Escherichia coli* (test system “Ecolum”) (PND F T 14.1:2:3:4.11-04), protozoans *Paramecium caudatum* Ehrenberg (FR.1.39.2015.19242), and Entomostracans *Daphnia magna* Straus (FR.1.39.2007.03222).

3. Results and discussion

The CB species composition of Belokholunitsky and Omutninsky reservoirs includes 14 taxa. We identified *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs, *Aphanizomenon* sp., *Aphanizomenon gracile* Lemmermann, *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen, *Dolichospermum circinale* (Rabenhorst ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum planctonicum* (Brunnthal) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum* sp., *Gomphosphaeria lacustris* var. *compacta* Lemmermann, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis viridis* (A. Braun) Lemmermann, *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek, *Pseudanabaena galeata* Böcher, *Spirulina laxissima* G.S.West. The minimum CB abundance (0.008-0.027 mln cells/L) and biomass (0.0007-0.022 mg/L) were typical to the near-dam sites with unfavorable conditions for CB development (low biogenic element content, strong wind

water mixing). Maximum CB abundance and biomass was found in shallow, well-warmed sites in the upper reaches of reservoirs. Thus, in the upper reaches of the Belokholunitskoye reservoir they amounted 14.8 mln cells/L and 1.55 mg/L, respectively.

According to the molecular genetic analysis, all water samples contained CB species with the *mcyE* gene, potentially capable to produce MS. Species of the genera *Microcystis* and *Dolichospermum* may be the most probable producers of MS. Cyanobacteria with *anaC* gene and potentially capable to produce AN-a neurotoxin were found in the most of the analyzed samples. Potential AN-a producers in Belokholunitsky reservoir are *A. flos-aquae* and *D. planctonicum*, in Omutninsky reservoir – *C. issatschenkoi* and *D. flos-aquae*. The *stxA* gene responsible for the STX neurotoxin biosynthesis and the *cyrJ* gene responsible for the hepato- and cytotoxin CYN biosynthesis were undetected in CB in any sample. This indicates the absence of STX- and CYN-producing cyanobacteria in the studied water bodies.

In the reservoir sites with MS and AN-a producing CB, water was acute toxic to bacteria and protozoa, but non-toxic to Entomostracans (Table). With reference to published data (Boas et al., 2020), we know that *P. caudatum* is more sensitive to MS and less studied microgynines in comparison with more highly organized species. The sensitivity of *P. caudatum* to cyanotoxins is also confirmed in our study. According to Nogueira et al. (2004), the decrease of cytosolic glutathione-S-transferases activity is observed during short-term exposure of *D. magna* to cyanotoxins. Prolonged exposure and high cyanotoxin content caused a decrease in growth rate, fecundity and reduced survival of *D. magna* (Nogueira et al., 2004; Schwarzenberger, 2022). While conducting water biotesting with daphnia in our study, we evaluated only one indicator – death of daphnia over 4 days. Obviously, at low cyanotoxin content in water and with short-term exposure to the toxicant, this indicator is uninformative. There is very little information available on the application of luminescent

Table. Results of molecular genetic detection of toxin-producing cyanobacteria and biotesting of water from water reservoirs of Kirov region in 2023

Reservoir site	Presence of genes responsible for the cyanotoxin synthesis	Toxicity Index (T), the degree of toxicity of water as determined by a test object:		Death of <i>Daphnia magna</i> , %
		<i>Escherichia coli</i>	<i>Paramecium caudatum</i>	
Belokholunitsky reservoir				
upper reaches	<i>mcyE, anaC</i>	T = 64.3 ± 2.9 high	T = 0.30 ± 0.02 permissible	0
middle	<i>mcyE, anaC</i>	T = 39.0 ± 8.2 medium	T = 0.73 ± 0.02 high	0
near-dam	<i>mcyE, anaC</i>	T = 33.0 ± 6.4 medium	T = 0.31 ± 0.02 permissible	0
Omutninsky reservoir				
middle	<i>mcyE, anaC</i>	T = 16.4 ± 10.4 permissible	T = 0.56 ± 0.27 medium	0
near-dam	<i>mcyE, anaC*</i>	T = 12.0 ± 6.1 permissible	T = 0.59 ± 0.18 medium	0

Note: * – was not present in all samples.

bacteria to assess the cyanotoxin toxicity (Kalinnikova et al., 2018). Our study have shown that “Ecolum” test system is quite sensitive to cyanotoxin content in water. It can be used in water bodies monitoring for rapid assessment of toxicity of waters that contain toxin-producing CB. The results of molecular genetic detection of toxin-producing CB and biotesting were compared. It was observed at the trend level that the simultaneous presence of both MS- and AN-a-producing CB in the analyzed samples increased the water toxicity for laboratory test organisms in comparison with the samples where only MS-producers were present. However, the correlation between the occurrence of toxin-producing cyanobacteria and the degree of water toxicity was rather weak ($r=0.55$ at $p\leq 0.05$).

4. Conclusuon

Cyanobacterial “blooming” of water is a widespread phenomenon in freshwater continental water bodies. Toxin-producing CB are particularly dangerous in such “blooms”. Using molecular genetic methods, the detection of cyanotoxin biosynthesis genes (MS, CYN, AN-a, STX) was carried out for the first time in two largest water reservoirs of Kirov region. The *mcyE* gene responsible for MS production was detected in CB in all analyzed samples. The *anaC* gene involved in the biosynthesis of AN-a neurotoxin was detected in the most samples. The most probable MS and AN-a producers in the studied reservoirs are species of the genera *Microcystis* and *Dolichospermum*, as well as *C. issatschenkoi* and *A. flos-aquae*. Water from Belokholunitsky and Omutninsky reservoirs had an acute toxic effect on *E. coli* and protozoa *P. caudatum*, while the degree of water toxicity increased with the simultaneous presence in samples of MS and AN-a producing CB. In further monitoring studies on water reservoirs of the Kirov region we plan to quantify the content of cyanotoxins in water and select a set of the most sensitive test-organisms for rapid assessment of toxicity of waters subjected to “blooming” by toxin-producing CB.

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-77-01034).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Boas L.A.V., Senra M.V.X., Fernandes K. et al. 2020. *In vitro* toxicity of isolated strains and cyanobacterial bloom biomasses over *Paramecium caudatum* (ciliophora): Lessons from a non-metazoan model organism. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 202: 110937. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.110937](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110937)
- Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Shirokaya A.A. et al. 2021. *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 1101-1110. DOI: [10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101)
- Kalinnikova T.B., Gainutdinov M.Kh., Shagidulin R.R. 2018. Methods for bioassay of toxins produced by cyanobacteria (review). *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology] 2: 35-46. (in Russian)
- Neverova-Dziopak Ye.V., Tsvetkova L.I., Makarova S.V. et al. 2012. On the ecological safety of water bodies. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education] 3: 1-9. (in Russian)
- Nogueira I.C.G., Pereira P., Dias E. et al. 2004. Accumulation of paralytic shellfish toxins (PST) from the cyanobacterium *Aphanizomenon issatschenkoi* by the cladoceran *Daphnia magna*. *Toxicon* 44: 773-780. DOI: [10.1016/j.toxicon.2004.08.006](https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2004.08.006)
- Paerl H.W., Otten T.G., Kudela R. 2018. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum. *Environmental Science & Technology* 52(10): 5519-5529. DOI: [10.1021/acs.est.7b05950](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05950)
- Schwarzenberger A. 2022. Negative effects of cyanotoxins and adaptative responses of *Daphnia*. *Toxins* 14(11): 770. DOI: [10.3390/toxins14110770](https://doi.org/10.3390/toxins14110770)
- Sidelev S.I., Babanazarova O.V. 2020. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water of some Russian cities: search for producers and approbation of removal methods. *Vodnye resursy* [Water resources] 47(2): 218-229. (in Russian) DOI: [10.31857/S0321059620020182](https://doi.org/10.31857/S0321059620020182)
- Sini P., Dang T.B.C., Fais M. et al. 2021. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 8726. DOI: [10.3390/ijms22168726](https://doi.org/10.3390/ijms22168726)
- Voyakina E.Ju., Russkikh Ia.V., Chernova E.N. et al. 2020. Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest. *Theoretical and Applied Ecology* 1: 124-129. DOI: [10.25750/1995-4301-2020-1-124-129](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-124-129) (in Russian)

Выявление токсинпродуцирующих цианобактерий в водохранилищах Кировской области и оценка их связи с токсичностью воды для гидробионтов

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСысолятина М.А.¹, Сиделев С.И.², Кутявина Т.И.^{1*}¹ Вятский государственный университет, Московская ул., 36, Киров, 610000, Россия² Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Советская ул., 14, Ярославль, 150003, Россия

АННОТАЦИЯ. С использованием молекулярно-генетических методов анализа впервые проведена детекция генов биосинтеза цианотоксинов (микроцистина, цилиндроспермопсина, анатоксина-а и сакситоксинов) в двух крупнейших водохранилищах Кировской области (Белохолуницком и Омутнинском), расположенных на северо-востоке Русской равнины в подзоне южной тайги. Во всех образцах фитопланктона обнаружен ген *тсуЕ*, отвечающий за продукцию микроцистина, а в большинстве образцов - ген *анаС*, подтверждающий способность цианобактерий продуцировать анатоксин-а. Из 14 видов цианобактерий, обнаруженных в фитопланктоне, наиболее вероятными продуцентами микроцистина в изученных водоемах являются виды рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*. Наиболее вероятными продуцентами анатоксина-а в Белохолуницком водохранилище являются виды *Aphanizomenon flos-aquae* и *Dolichospermum planctonicum*, в Омутнинском - *Cuspidothrix issaschenkoi* и *Dolichospermum flos-aquae*. Вода из исследованных водоемов оказывала острое токсическое действие на люминесцентных бактерий *Escherichia coli* (тест-система «Эколюм») и простейших *Paramecium caudatum* Ehrenberg, но не была токсична для низших ракообразных *Daphnia magna* Straus.

Ключевые слова: «цветение» воды, цианотоксин, биотестирование, токсичность

Для цитирования: Сысолятина М.А., Сиделев С.И., Кутявина Т.И. Выявление токсинпродуцирующих цианобактерий в водохранилищах Кировской области и оценка их связи с токсичностью воды для гидробионтов // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 1109-1114. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1109

1. Введение

Цианобактериальные «цветения» водных объектов всё чаще становятся проблемой для водоснабжения, рыболовства, рекреационного и туристического использования водоёмов (Paerl and Otten, 2018; Воякина и др., 2020; Сиделев и Бабаназарова, 2020; Bondarenko et al., 2021). Предполагается, что токсины, продуцируемые некоторыми видами цианобактерий (ЦБ), вызывают различные аллергические реакции и могут быть связаны с такими болезнями человека как боковой амиотрофический склероз, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и др. (Sini et al., 2021). В связи с этим актуальным направлением научных исследований в настоящее время является выявление в водоёмах токсигенных ЦБ и поиск способов регулирования их численности. Целью нашей работы было выявление токсинпродуцирующих ЦБ в водохранилищах Кировской области с помощью молекулярно-генетических мето-

дов и оценка связи ЦБ с токсичностью воды для гидробионтов.

2. Материалы и методы

Объектами исследования были русловые водохранилища (Белохолуницкое и Омутнинское), расположенные на северо-востоке Русской равнины в подзоне южной тайги. Согласно классификации вод по трофо-сапробным показателям, принятой в ГОСТ 17.1.2.04-77, оба водохранилища являются бета-мезосапробными, по величине индекса трофического состояния (Неверова-Дзюпак и др., 2012) – эвтрофными.

Пробы воды для изучения фитопланктона отбирали путём зачерпывания воды с поверхности водоёмов (глубина 0–30 см) в августе 2023 г. Видовую идентификацию ЦБ проводили методом прямого микроскопирования с использованием

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: kutyavinati@gmail.com (Т.И. Кутявина)

Поступила: 24 июня 2024; Принята: 12 июля 2024;

Опубликована online: 30 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



микроскопа лабораторного Микмед-6 вариант 7 (Россия) и определителей. Названия видов приведены в соответствии с <https://www.algaebase.org/> (дата обращения: 03.06.2024).

Для выделения ДНК и проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР) пробы фитопланктона концентрировали на мембранных фильтрах марки МФАС-ОС-2 с диаметром пор 0,45 мкм («Владипор», Россия). Поиск генов биосинтеза цианотоксинов (микроцистина (MC), цилиндроспермопсина (CYN), анатоксина-а (AN-а) и сакситоксинов (STX)) проводили методом классической ПЦР с использованием специфичных праймеров по ранее описанной методике (Сиделев и Бабаназарова, 2020).

Токсичность воды из водохранилищ определяли с использованием трёх лабораторных тест-объектов, относящихся к разным трофическим уровням, по аттестованным методикам измерений: люминесцентных бактерий *Escherichia coli* (тест-система «Эколюм») (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04), простейших *Paramecium caudatum* Ehrenberg (ФР.1.39.2015.19242) и низших ракообразных *Daphnia magna* Straus (ФР.1.39.2007.03222).

3. Результаты и обсуждение

В видовом составе ЦБ Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ выявлено 14 таксонов: *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs, *Aphanizomenon* sp., *Aphanizomenon gracile* Lemmermann, *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen, *Dolichospermum circinale* (Rabenhorst ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum planctonicum* (Brunnthal) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Dolichospermum* sp., *Gomphosphaeria lacustris* var. *compacta* Lemmermann, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis viridis* (A. Braun) Lemmermann, *Microcystis wesenbergii* (Komárek

Komárek ex Komárek, *Pseudanabaena galeata* Böcher, *Spirulina laxissima* G.S.West. Минимальная численность (0,008–0,027 млн. кл./л) и биомасса ЦБ (0,0007–0,022 мг/л) были характерны для приплотинных участков водохранилищ, где для развития ЦБ складываются неблагоприятные условия (малое количество биогенных элементов, сильное ветровое перемешивание вод). Максимальные значения численности и биомассы ЦБ отмечены на мелководных хорошо прогреваемых участках в верховьях водохранилищ. Так, в верховье Белохолуницкого водохранилища они достигали 14,8 млн. кл./л и 1,55 мг/л, соответственно.

Согласно результатам молекулярно-генетического анализа, во всех пробах воды присутствовали виды ЦБ, содержащие ген *msyE* и потенциально способные продуцировать MC. Наиболее вероятными продуцентами MC в изучаемых водохранилищах могут быть виды рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*. В большинстве проанализированных проб обнаружены ЦБ, содержащие ген *anaC* и потенциально способные продуцировать нейротоксин AN-а. Потенциальными продуцентами AN-а в Белохолуницком водохранилище являются виды *A. flos-aquae* и *D. planctonicum*, в Омутнинском – *C. issatschenkoi* и *D. flos-aquae*. Ген *stxA*, отвечающий за биосинтез нейротоксина STX, и ген *cyrJ*, отвечающий за биосинтез гепато- и цитотоксина CYN, не были обнаружены у ЦБ ни в одной из проб. Это свидетельствует об отсутствии STX- и CYN-продуцирующих ЦБ в пробах воды из исследуемых водоёмов.

Вода на участках, где были обнаружены ЦБ, способные к продуцированию MC и AN-а, оказывала острое токсическое действие на бактерий и простейших, но не являлась токсичной для низших ракообразных (Таблица). Из литературных данных известно, что *P. caudatum* является более чувствительным организмом к действию MC и менее изученных микрогининов, чем более высоко организованные организмы (Boas et al., 2020). Чувствительность

Таблица. Результаты молекулярно-генетической детекции токсинпродуцирующих цианобактерий и биотестирования воды из водохранилищ Кировской области в 2023 г.

Участок водохранилища	Наличие генов, отвечающих за синтез цианотоксинов	Индекс токсичности (Т), степень токсичности воды, определённая с помощью тест-объекта:		Гибель <i>Daphnia magna</i> , %
		<i>Escherichia coli</i>	<i>Paramecium caudatum</i>	
Белохолуницкое водохранилище				
верховье	<i>msyE</i> , <i>anaC</i>	T = 64,3 ± 2,9 высокая	T = 0,30 ± 0,02 допустимая	0
средний	<i>msyE</i> , <i>anaC</i>	T = 39,0 ± 8,2 средняя	T = 0,73 ± 0,02 высокая	0
приплотинный	<i>msyE</i> , <i>anaC</i>	T = 33,0 ± 6,4 средняя	T = 0,31 ± 0,02 допустимая	0
Омутнинское водохранилище				
средний	<i>msyE</i> , <i>anaC</i>	T = 16,4 ± 10,4 допустимая	T = 0,56 ± 0,27 умеренная	0
приплотинный	<i>msyE</i> , <i>anaC</i> *	T = 12,0 ± 6,1 допустимая	T = 0,59 ± 0,18 умеренная	0

Примечание: * - присутствовал не во всех пробах.

P. caudatum к действию цианотоксинов подтверждается и нашим исследованием. У *D. magna*, как отмечает ряд авторов, при краткосрочном воздействии цианотоксинов наблюдается уменьшение активности цитозольных глутатион-S-трансфераз (Nogueira et al., 2004), а при длительном воздействии и при высоких концентрациях цианотоксинов уже отмечаются такие ответные реакции, как снижение темпов роста, плодовитости и уменьшение выживаемости (Nogueira et al., 2004; Schwarzenberger, 2022). В нашем исследовании при проведении биотестирования воды с помощью дафний мы оценивали только один показатель – гибель организмов за 4 суток. Очевидно, при вероятно невысокой концентрации цианотоксинов в воде и при краткосрочном воздействии токсиканта этот показатель не является информативным. Об использовании люминесцентных бактерий для оценки токсичности цианотоксинов в литературе приводится очень мало сведений (Калинникова и др., 2018). Наши исследования показали, что тест-система «Эколюм» на основе *E. coli* довольно чувствительна к содержанию цианотоксинов в воде и может быть использована в мониторинге водных объектов для экспресс-оценки токсичности вод, содержащих токсинпродуцирующие ЦБ. Проведено сопоставление результатов молекулярно-генетической детекции токсинпродуцирующих ЦБ и биотестирования. Отмечено на уровне тенденции, что при одновременном присутствии в анализируемых пробах ЦБ, способных потенциально продуцировать МС и АН-а, степень токсичности воды для лабораторных тест-организмов повышалась по сравнению с таковой в пробах, где присутствовали только продуценты МС. Однако корреляционная связь между встречаемостью цианобактерий-продуцентов токсинов и степенью токсичности воды была довольно слабой ($r = 0,55$ при $p \leq 0,05$).

4. Заключение

Цианобактериальное «цветение» воды – довольно широко распространённое явление в пресноводных континентальных водных объектах. Особую опасность при таких «цветениях» представляют токсинпродуцирующие ЦБ. С помощью молекулярно-генетических методов анализа впервые проведена детекция генов биосинтеза цианотоксинов (МС, СУН, АН-а, СТХ) в двух крупнейших водохранилищах Кировской области. Во всех проанализированных пробах у ЦБ обнаружен ген *mscE*, отвечающий за продуцирование МС, и в большинстве проб – ген *anaC*, участвующий в биосинтезе АН-а. Наиболее вероятными продуцентами МС и АН-а в исследуемых водохранилищах являются виды рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*, а также *Cuspidothrix issatschenkoi* и *Aphanizomenon flos-aquae*. Вода из Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ оказывала острое токсическое воздействие на *Escherichia coli* и простейших *Paramecium caudatum*, при этом степень токсичности воды возрастала при одновременном присутствии в пробах

ЦБ, способных потенциально продуцировать МС и АН-а. В дальнейших мониторинговых исследованиях на водохранилищах Кировской области планируется провести количественную оценку содержания цианотоксинов в воде и подобрать комплекс из наиболее чувствительных тест-организмов для экспресс-оценки токсичности вод, подверженных «цветению» токсинпродуцирующими ЦБ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01034).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Воякина Е.Ю., Русских Я.В., Чернова Е.Н. и др. 2020. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России. Теоретическая и прикладная экология. 1: 124–129. DOI: [10.25750/1995-4301-2020-1-124-129](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-124-129)
- Калинникова Т.Б., Гайнутдинов М.Х., Шагидуллин Р.Р. 2018. Методы биотестирования токсинов, продуцируемых цианобактериями (обзор). Российский журнал прикладной экологии 2: 35-46.
- Неверова-Дзюпак Е.В., Цветкова Л.И., Макарова С.В. и др. 2012. Об экологической безопасности водных объектов. Современные проблемы науки и образования 3: 1-9.
- Сиделев С.И., Бабаназарова О.В. 2020. Обнаружение цианобактериальных токсинов в источниках водоснабжения и водопроводной воде некоторых городов России: поиск продуцентов и апробация методов удаления. Водные ресурсы 47(2): 218-229. DOI: [10.31857/S0321059620020182](https://doi.org/10.31857/S0321059620020182)
- Boas L.A.V., Senra M.V.X., Fernandes K. et al. 2020. *In vitro* toxicity of isolated strains and cyanobacterial bloom biomasses over *Paramecium caudatum* (ciliophora): Lessons from a non-metazoan model organism. Ecotoxicology and Environmental Safety 202: 110937. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.110937](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110937)
- Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Shirokaya A.A. et al. 2021. *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 1101-1110. DOI: [10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101)
- Nogueira I.C.G., Pereira P., Dias E. et al. 2004. Accumulation of paralytic shellfish toxins (PST) from the cyanobacterium *Aphanizomenon issatschenkoi* by the cladoceran *Daphnia magna*. *Toxicol* 44: 773–780. DOI: [10.1016/j.toxicol.2004.08.006](https://doi.org/10.1016/j.toxicol.2004.08.006)
- Paerl H.W., Otten T.G., Kudela R. 2018. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum. *Environmental Science & Technology* 52(10): 5519–5529. DOI: [10.1021/acs.est.7b05950](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05950)
- Schwarzenberger A. 2022. Negative effects of cyanotoxins and adaptive responses of *Daphnia*. 14(11): 770. DOI: [10.3390/toxins14110770](https://doi.org/10.3390/toxins14110770)
- Sini P., Dang T.B.C., Fais M. et al. 2021. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 8726. DOI: [10.3390/ijms22168726](https://doi.org/10.3390/ijms22168726)