

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЛИЧИЯ ЦИАНОТОКСИНОВ В ВОДОЕМАХ И ВОДОТОКАХ БЕЛАРУСИ

Т. М. МИХЕЕВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

На 20 водных объектах Беларуси, используемых для массового отдыха населением, впервые проведена оценка видового состава, численности и биомассы цианобактерий при «цветении» воды, а также результаты поиска среди них токсичных видов. Выявлено 50 представителей цианобактерий, отнесенных к 18 родам, из них 3 вида отмечены впервые для Беларуси – *Snowella atomus* Komárek et Hindák, *Anabaenopsis arnoldii* Aptekar, *Anabaenopsis kelifii* Kog. С помощью сочетания молекулярно-биологических и аналитических методов в исследовании токсичных «цветений», использования генетических маркеров, выполнен поиск генов синтеза гепатотоксичного микроцистина, нодулярина и цилиндроспермозина, нейротоксичного сакситоксина. Показано, что во всех исследованных водоемах и водотоках присутствовали цианобактерии родов *Anabaena* и *Microcystis*, синтезирующие высокотоксичные микроцистины – LR, RR, YR. Гены синтеза сакситоксина и близкие ему варианты паралитических токсинов, такие как гониатоксины 5, 6, декарбамоилгониатоксин 2, декарбамоилсакситоксин и неосакситоксин, обнаружены в 7 водоемах.

Ключевые слова: Беларусь; водоемы и водотоки; цианобактерии; цианотоксины.

THE FIRST INVESTIGATONS OF CYANOTOXINS PRESENCE IN WATERBODIES AND WATERCOURSES OF BELARUS

Т. М. MIKHEYEVA^a

^aBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, 220030, Minsk 220030, Belarus

The estimation of species composition, abundance and biomass of cyanobacteria in “bloom” as well as the search for toxic species has been undertaken for the first time in 20 water bodies and water courses of Belarus mainly used for public recreation. There were identified 50 representatives of cyanobacteria assigned to 18 genera, among them three species were marked for the first time for the Belarus: *Snowella atomus* Komárek et Hindák., *Anabaenopsis arnoldii* Aptekar, *Anabaenopsis kelifii* Kog. By combining molecular-biological and analytical methods and by using genetic markers when studying toxic «water blooms» the search of genes responsible for synthesis of hepatotoxic microcystin, nodularin, cylindrospermoxin and neurotoxic saxitoxin was undertaken. It has been shown that in all the investigated lakes and rivers there were cyanobacterium relating to *Anabaena* and *Microcystis* genera that can synthesize highly toxic microcystins – LR, RR, YR. Saxitoxin synthesis genes and close to it variants of paralytic toxins such as goniatoxins 5, 6, dekarbamoilgoniatoxin 2, dekarbamoilsaksitoxin and neosaksitoxin were found in 7 waterbodies.

Keywords: Belarus; water bodies and water courses; cyanobacteria; cyanotoxins.

Образец цитирования:

Михеева ТМ. Первые исследования наличия цианотоксинов в водоемах и водотоках Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;1:52–61.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-1-52-61>

For citation:

Mikheyeva TM. The first investigatons of cyanotoxins presence in waterbodies and watercourses of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;1:52–61. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-1-52-61>

Автор:

Тамара Михайловна Михеева – доктор биологических наук, доцент; главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Author:

Tamara M. Mikheyeva, doctor of science (biology), docent; chief researcher at the research laboratory of aquatic ecology.
mikheyeva@tut.by

Введение

Проблема цианобактериального «цветения» водоемов и водотоков является одной из центральных задач лимнологии. Климатические изменения и антропогенное влияние на водные экосистемы инициировали в них длительное «цветение» (изменение окраски воды, преимущественно, за счет цианобактерий – (другие названия – цианопрокариоты, или, как их называли ранее, сине-зеленые водоросли, *Cyanophyta*), сопряженное с гибелю биотического комплекса самоочищения воды и опасностью для здоровья и хозяйственной деятельности человека. Массовое и быстрое развитие этих водорослей в водоеме, происходящее чаще всего при доминировании одного-двух видов, получило название «цветение» воды. Лавинообразное размножение цианобактерий при их лизисе (гибели) приводит к образованию значительного количества особо ядовитых токсинов [1].

По данным мировой статистики, примерно в 50 % случаев «цветения» воды происходит развитие токсичных цианобактерий и в воде присутствуют несколько видов токсинов. По рекомендации ВОЗ во многих странах проводится мониторинг токсинов в питьевой воде, утверждены их предельно допустимые концентрации. Зарегистрированы факты токсичных «цветений» цианобактерий во многих странах мира, однако в водоемах Беларуси токсиногенные цианобактерии ранее не выявляли.

Целью нашей работы был поиск и идентификация с помощью молекулярно-биологических и аналитических методов потенциально токсичных видов цианобактерий в разнотипных хозяйствственно важных водоемах республики (озерах, водохранилищах, водотоках, рыбоводных прудах и др.) для определения степени их развития и возможного неблагоприятного влияния на качество воды при массовом развитии. В Беларуси первые исследования по выявлению токсиногенных цианобактерий в фитопланктоне р. Свислочь и находящихся на ней водохранилищ начаты в 2009 г. [2–5].

Объекты и методика исследований

В период массового развития фитопланктона нами проводился анализ его структуры и выявление потенциально токсичных видов цианобактерий в высокоеутрофном оз. Большие Швакшты, эутрофном оз. Мястро, мезотрофном оз. Нарочь, эвтрофном оз. Кромань, гиперэвтрофных городских прудах в г. Несвиж, в высокоеутрофных водохранилищах Вилейско-Минской водной системы (Вилейское, Заславское, Криницы и Лебяжье), водохранилищах на р. Свислочь (Цнянское, Дрозды, Чижовское, Комсомольское озеро, Осиповичское), в р. Вилия, в канале сброса воды из Вилейского водохранилища в Заславское, в различных зонах эвтрофного оз. Лукомское, включая зону подогрева воды Лукомльской ГРЭС, где развитие цианобактерий было более интенсивным, в садковой линии Березовской ГРЭС, на городском участке («Солнечная долина») Лошицкой водной системы и в городском пруду Щемыслицкий (г. Минск).

В результате в 2012–2013 гг. в период с мая по сентябрь проведена оценка видового состава, численности и биомассы общего фитопланктона и цианобактерий на указанных водных объектах Беларуси, используемых населением для массового отдыха. Для оценки количественного развития фитопланктона и цианобактерий использовались традиционные методы гидробиологии, в частности осадочный метод и световую микроскопию. Осадочные пробы объемом 0,5 л, фиксировались по Утермелю в нашей модификации [6]. Видовой состав фитопланктона приводится на основании учета организмов при камеральной обработке количественных проб в световом микроскопе AxioStar. Эти методы уже длительное время успешно применяются нами при мониторинговых исследованиях.

Российскими партнерами в рамках выполнения проекта научно-исследовательской работы «Выявление токсичных цианобактерий в фитопланктона крупнейших хозяйствственно важных водоемов и водотоков России и Беларуси с оценкой их негативного влияния на качество воды» согласно договору с БРФФИ № Б12Р-028 от 15.04.2012 г. с помощью сочетания молекулярно-биологических и аналитических методов, использования генетических маркеров проводился поиск генов синтеза гепатотоксичного микроцистина, нодулярина, цилиндроспермозина и нейротоксичного сакситоксина, цианотоксинов и определение их химического состава [7]. Подробно методика определения цианотоксинов приведена в работах [3, 8–11].

Результаты исследований и их обсуждение

В исследованных водоемах и водотоках республики разной степени трофности в купальные сезоны 2012–2013 гг. зарегистрировано 50 таксонов цианобактерий, представляющих 18 родов: *Anabaenopsis* (2 вида), *Anabaena* (8), *Aphanizomenon* (3), *Aphanothece* (1), *Coelosphaerium* (2), *Cyanodictyon* (2), *Gloeocapsa* (7), *Gomphosphaeria* (2), *Lemmermanniella* (1), *Lyngbya* (2), *Merismopedia* (2), *Microcystis* (7), *Oscillatoria* (3), *Rhabdoderma* (2), *Romeria* (1), *Snowella* (1), *Synechocystis* (2), *Woronichinia* (1), *Gloeotrichia* (1), из которых только два рода (*Anabaena* и *Aphanizomenon*) имеют гетероцисты. Для альгофлоры Беларуси отмечены новые виды: *Snowella atomus* Komárek et Hindák, *Anabaenopsis arnoldii* Aptekar, *A. kelifi* Kog. Последние

два вида обнаружены в Лошицкой водной системе на городском отрезке («Солнечная долина»), при этом оба вида развивались в значительном количестве, *A. kelifi* составлял, например, 7 % от общей биомассы фитопланктона. Ранее его фиксировали только в Туркмении. Следует указать, что еще один представитель этого рода *A. raciborskii* Wołosz., который в последние годы стал распространяться во многих водоемах во всем мире, в том числе в России, вызывая их «цветение», в Беларуси единично отмечался нами ранее в оз. Паульское Витебской области [12], а также в водоеме-охладителе Березовской ГРЭС. В значительном количестве *S. atomus* отмечена в городском пруду 2 г. Несвижа (табл. 1).

Наибольшее разнообразие цианопрокариот отмечено в высокоэвтрофном оз. Большие Швакшты (23 представителя), близки к нему водохранилище Дрозды (21) и Заславское (19). Наименьшее число представителей выявлено в водохранилище Лебяжье (3), в гипертрофном городском пруду 1 г. Несвижа (4) и в слабоэвтрофном оз. Кромань (5), за ним в порядке возрастания расположились гипертрофный пруд 2 в г. Несвиже (9), р. Вилия (10), слабоэвтрофное водохранилище Криницы (10) и гиперэвтрофное водохранилище Осиповичское (10), высокотрофное Чижковское (12) и менее трофное Цнянское (16) водохранилище, а также Комсомольское озеро (17 таксонов).

Степень индивидуального участия видов цианопрокариот в составе их доминирующих комплексов варьировалась от 5,4 до 87,9 %. По степени доминирования выделяется безгетероцистный *M. wesenbergii* Komárek, который преобладал в более чем половине исследованных объектов. Максимального участия в общей биомассе фитопланктона он достиг в Комсомольском озере – 87,9 %. В водохранилищах Заславском, Осиповичском и Комсомольском озере существенную биомассу составлял другой представитель рода *Microcystis* – *M. aeruginosa* (Kütz.) Elenk. f. *aeruginosa*, в Комсомольском озере он составил около 50 % биомассы, в Осиповичском водохранилище – около 40 %, в Заславском – более 30 %. Другие представители цианобактерий достигали максимальных значений биомассы соответственно: *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Bréb. f. *aeruginosa* – в городском пруду 2 в г. Несвиже (22 %), *A. planctonica* Brunnth. – в оз. Лукомском (66,5 %), *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs f. *flos-aquae* – в р. Вилии (73 %) и в городском пруду №1 в г. Несвиже (около 65 %), *Aph. elenkinii* Kisselev – в Лошицкой водной системе (около 19 %), *Aphanothece clathrata* W. et G. S. West f. *clathrata* – в Цнянском водохранилище (свыше 50 %) и в оз. Большие Швакшты (36,6 %). Во многих водоемах, особенно в водоемах Вилейско-Минской водной системы, видом, сопутствующим колониальным цианобактериальным организмам, был одноклеточный представитель цианопрокариот *Synechocystis aquatilis* (Sauv.), составлявший по численности организмов 76–98 %. Своеобразием доминирующего состава отличались оз. Лукомское, р. Вилия, городские пруды Несвижа и Лошицкой водной системы. В последней по численности организмов доминировала *Oscillatoria limnetica* f. *acicularis* (Nyg.) V. Poljansk. (= *Pseudanabaena acicularis*), достигнув 91,7 %. Полный видовой состав цианобактерий в каждом изучавшемся объекте и их доминировавшие по численности организмы, клеток и биомассе комплексы из-за их большого объема не могут быть отражены в рамках данной статьи. Они приведены в соответствующем отчете [13].

По численности клеток цианобактерий во всех исследованных водных экосистемах имели абсолютное доминирование в период исследования. Они же в большинстве водоемов в июле – августе преобладали и в общей биомассе фитопланктона, достигая в некоторых из них более 95 %. Так, в Заславском водохранилище при общей биомассе фитопланктона во время «цветения» более 1 г/л цианобактерии составляли 99,7 %. Высокий уровень биомассы отмечен в водоемах Вилейско-Минской водной системы. Даже в верхних менее трофных водохранилищах на р. Свислочь, например, в водохранилище Криницы, отмечалась биомасса фитопланктона свыше 40 мг/л с долей цианобактерий 98,5 %. В Комсомольском озере они составляли 77 % в общей биомассе, равной 90 мг/л. В нижнем же Осиповичском водохранилище биомасса фитопланктона достигала 1200 мг/л, из них на долю цианобактерий приходилось около 64 %.

По общей биомассе фитопланктона выделяются городские пруды г. Несвиж, в которых отмечена биомасса 60–107 мг/л, доля цианопрокариот в ней составляет 65–96 %. Такая же доля цианей в общей биомассе фитопланктона (более 30 мг/л) характерна и для высокоэвтрофного оз. Большие Швакшты. Многолетние исследования, проводимые нами на Нарочанских озерах, показывают, что в мезотрофном оз. Нарочь доля цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона на разных этапах эволюции его трофического статуса изменялась от (10,7±3,4) до (22,3±9,3) %, а в слабоэвтрофном оз. Мястро – от (6,9±4,7) до (28,0±19,7) % [14].

Таким образом, видовой состав цианобактерий, зарегистрированных в изученных водоемах и водотоках Беларуси, и степень их количественного развития в купальный сезон, несомненно, могут свидетельствовать о том, что многие из них чрезвычайно широко распространены до степени «цветения» в водоемах разной степени трофности. Наличие среди них большого числа токсиногенных представителей свидетельствует о том, что они могут продуцировать токсические вещества и оказывать негативное влияние на гидробионтов, человека и качество воды в целом.

Таблица 1

Таблица 1

Видовой состав Cyanophyta в исследованных водоемах и водотоках

Cyanophyta species composition in the investigated water bodies and water courses

| Виды | Водохранилища | | | | | | | | Озера | | | | | | |
|--|---------------|-----------|----------|--------|-------------|---------|------------|--------------|-------|---------|------------------|-------------------|----|----|----|
| | p. Бурна | Заселение | Кропинки | Любимы | Комс. Озепо | Любимка | Онегинское | Б. Ильинское | Кромы | Лебяжье | Типы I (Нечист.) | Типы II (Нечист.) | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| <i>Anabaenopsis arnoldii</i> Aptekar | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. kelipii</i> Kog. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Anabaena</i> Bory sp. | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. flos-aquae</i> (Lyngb.) Bréb. f. <i>flos-aquae</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. hassallii</i> (Kütz.) Wittm. f. <i>hassallii</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. lemmermannii</i> P. Richt. | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. planctonica</i> Brunnth. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + |
| <i>A. scheremetjevi</i> Elenk. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. sigmaidea</i> Nyg. (= <i>A. circinalis</i> (Kütz.) Hansg. ex Lemm.) | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>A. spirooides</i> Kleb. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + |
| <i>Aphanizomenon elenkinii</i> Kisselev | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Aph. flos-aquae</i> (L.) Ralfs f. <i>flos-aquae</i> | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + |
| <i>Aph. issatschenkoi</i> Usač. (= <i>Cuspidothrix issatschenkoi</i> (Usač.) Rajan.) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + |
| <i>Aphaniochece clathrata</i> W. et G. S. West | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Coelosphaerium dubium</i> Grun. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>C. kuetzingianum</i> Näg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Cyanodictyon planctonicum</i> Meyer | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>C. reticulatum</i> (Lemm.) Geitl. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Gloccapsa</i> (Kütz.) Hollerb. sp. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. minima</i> (Keissl.) Hollerb. ampl. <i>f. minima</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. minor</i> (Kütz.) Hollerb. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. minuta</i> (Kütz.) Hollerb. f. <i>minuta</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. violacea</i> (Corda) Rabenhorst | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. f. <i>limnetica</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Gomphosphaeria</i> Kützing sp. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>G. lacustris</i> Chod. f. <i>lacustris</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Окончание табл. 1

Ending table 1

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|----|----|----|----|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <i>Lemmermanniella pallida</i> (Lemm.) Geitler | – | – | – | – | – | – | – | + | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Lyngbya</i> Ag. sp. | – | – | – | – | – | – | – | – | + | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>L. limnetica</i> Lemm. | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Merismopedia minima</i> G. Beck. | – | – | + | + | + | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. tenuissima</i> Lemm. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Microcystis</i> (Kütz.) Elenk. sp. (= <i>Aphanocapsa</i> Näg. sp.) | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. aeruginosa</i> (Kütz.) Elenk. f. <i>aeruginosa</i> | – | – | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. aeruginosa</i> f. <i>flos-aquae</i> (Witt.) Elenk. (= <i>M. flos-aquae</i> (Witt.)) | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. aeruginosa</i> f. <i>viridis</i> (A. Br.) Elenk. (= <i>M. viridis</i> (A. Br.) Lemm.) | + | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. pulchra</i> (Wood.) Elenk. f. <i>pulchra</i> | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. pulchra</i> f. <i>delicatissima</i> (W. et G. S. West) Elenk. (= <i>Aphanocapsa delicatissima</i> W. et G. S. West) | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>M. wesenbergii</i> Komárek | – | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Oscillatoria</i> Vauch. sp. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>O. agardhii</i> Gom. f. <i>agardhii</i> (= <i>O. agardhii</i> Gom.) | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>O. limnetica</i> f. <i>acicularis</i> (Nyg.) V. Poljansk. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Rhabdoderma</i> Schmidle et Laut. sp. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Rh. lineare</i> Schmidle et Laut. em. Hollerb. | – | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Romeria gracilis</i> Kosz. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Snowella atomus</i> Komárek et Hindák | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Synechocystis</i> Näg. sp. | + | + | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>S. aquatilis</i> Sauv. | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Woronichinia naegeliana</i> (Ung.) Elenk. f. <i>naegeliana</i> | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| <i>Gloetrichia echinulata</i> (J. S. Smith) P. Richt. (= <i>Rivularia echinulata</i> P. Richt.) | – | + | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Более 50 таксонов, из них в водотоке/водотоке выявлено | 10 | 19 | 10 | 21 | 3 | 16 | 17 | 9 | 12 | 10 | 23 | 13 | 5 | 4 | 9 | |

Среди огромного количества видов (около 2000) цианобактерий, токсичными свойствами обладают лишь некоторые из них [15]. Сейчас известно около 40 видов потенциально токсиногенных цианобактерий [16]. По современным представлениям 40–50 % «цветений» являются токсичными [17].

Продуцирование токсинов в пресных водах наиболее часто связывают с доминированием в фитопланктоне представителей таких родов, как *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, *Nostoc* и *Aphanocapsa* [18]. В водоемах северо-западных регионов России, условия которых практически идентичны условиям Беларуси, обнаружено более 20 токсичных и потенциально токсичных видов преимущественно, цианобактерий, из которых 16 видов образуют сверхмассовое развитие. Половина из этих видов распространены в регионе повсеместно, в их числе *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Woronichinia naegeliana* (Ung.) Elenk. f. *naegeliana* (= *Coelosphaerium naegelianum* Ung.; = *Gomphosphaeria naegeliana* (Ung.) Lemm.), *Oscillatoria agardhii* (= *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom.), *Anabaena* (= *Dolichospermum*) *lemmermannii* P. Richt., *Aphanizomenon flos-aquae*, *A. flos-aquae* f. *klebahnii* Elenk. [17]. Часто во время «цветений» отмечают появление в воде гепатотоксинов, реже – нейротоксинов.

Токсины накапливаются в окружающей водной среде, аккумулируются в моллюсках, рыбе и других гидробионтах, далее передаются по трофической цепи наземным теплокровным животным и человеку. Отмечаются случаи отравления и смерти людей при употреблении в пищу рыбы из «цветущих» водоемов, следовательно, для предупреждения подобных фактов необходим контроль содержания цианотоксинов и в водоемах, использующихся в рекреационных целях и для рыболовства. Известны также отравления травоядных млекопитающих на водопое при попадании в пищеварительный тракт, как фитопланктона, так и самой воды. У млекопитающих цианотоксины могут поражать печень (гепатотоксины) или нервную систему (нейротоксины). Опасность представляет загрязнение цианотоксинами источников водоснабжения и водозаборов. Попадание токсинов внутрь вместе с питьевой водой или продуктами обуславливает возникновение различных заболеваний человека, диких и домашних животных, а в ряде случаев – и летальный исход [19]. Отравление может произойти при купании человека во время «цветения» воды [20]. Анализ проб из 241 озера США выявил, что концентрация микроцистинов повышается с увеличением трофического статуса озер [21].

В составе фитопланктона исследованных водных экосистем Беларуси впервые выявлены цианобактерии (табл. 2) двух родов, содержащие гены синтеза микроцистина [2; 3]. Получено 65 последовательностей гена синтеза микроцистина *mcyE* из пяти водоемов и водотоков Беларуси. Все последовательности принадлежали цианобактериям рода *Microcystis*. В пробах из семи водных объектов (табл. 2), ПЦР-положительных на наличие гена синтеза сакситоксина, было получено 4 последовательности *sxtA*-гена, на 99 % сходных с последовательностями штаммов *Anabaena circinalis* (Kütz.) Hansg. f. *circinalis*, *A. plantonica*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Aph. gracile* lemm., *Aph. ovalisporum* Forti и *Anabaenopsis elenkinii* V. Miller f. *elenkinii*.

Отметим, что в момент исследований и отбора проб на ПЦР-анализ в водоеме массово вегетировала *Anabaena* (= *Dolichospermum*) *lemmermannii*. Однако пока нельзя сказать определенно, был ли этот вид носителем гена синтеза сакситоксина.

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица по выявленным в 2012 г. цианотоксинам в водоемах и водотоках Беларуси

Table 2

The combined table of detected in 2012 cyanotoxins in water bodies and water courses of Belarus

| Место отбора пробы | Дата | Соединение | ПЦР + |
|--|------------|--|--|
| Озеро Лукомское, водоем-охладитель Лукомльской ГРЭС | 24.05.2012 | – | <i>mcyE</i> <i>sxtA</i> |
| Озеро Кромань | 29.06.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Aeruginosin 89 Kasumigamide C Cyanopeptoline A MCYST-LR MCYST-RR MCYST-YR | Проба от 27.07.12 <i>aerA</i> <i>mcyE</i> |
| Комсомольское озеро | 05.07.2012 | – | Нет пробы |

Продолжение табл. 2

Continuation table 2

| Место отбора пробы | Дата | Соединение | ПЦР + |
|--|------------|--|------------------------------|
| Водохранилище Дрозды | 05.07.2012 | – | mcyE sxtA |
| Цнянское водохранилище | 05.07.2012 | – | Нет пробы |
| Заславльское водохранилище | 05.07.2012 | – | mcyE sxtA |
| Чижовское водохранилище | 05.07.2012 | – | Нет пробы |
| г. Несвиж, городской пруд 1 | 06.07.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Kasumigamide C Aeruginosin 102 Anabaenopeptin B Anabaenopeptin E Anabaenopeptin F DemethylMCYST-RR* DemethylMCYST-YR** | mcyE aerA |
| г. Несвиж, городской пруд 2 | 12.07.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 620 | mcyE aerA |
| р. Вилия | 06.07.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Kasumigamide C Aeruginosin 102 Anabaenopeptin B Anabaenopeptin E Anabaenopeptin F DemethylMCYST-RR* DemethylMCYST-YR** | mcyE-6 сиквенсов aerA |
| Цнянское водохранилище | 25.07.2012 | – | mcyE aerA |
| Заславское водохранилище | 25.07.2012 | – | mcyE sxtA |
| Водохранилище Дрозды | 25.07.2012 | – | mcyE-10 сиквенсов sxtA |
| Озеро Лукомское, водоем-охладитель Лукомльской ГРЭС | 24.08.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Kasumigamide C Aeruginosin 102 MCYST-LR MCYST-RR | mcyE aerA |
| Озеро Большие Швакшты | 07.06.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Kasumigamide C Aeruginosin 102 MCYST-LR MCYST-RR | mcyE aerA |
| Озеро Мястро | 10.08.2012 | – | mcyE sxtA |
| Озеро Нарочь | 10.07.2012 | – | mcyE sxtA |
| Озеро Нарочь | 27.07.2012 | – | sxtA |

Окончание табл. 2

Ending table 2

| Место отбора пробы | Дата | Соединение | ПЦР + |
|-----------------------|------------|--|-----------------------------|
| Озеро Большие Швакшты | 05.07.2012 | Aeruginosin 606 Anabaenopeptin B DemethylMCYST-LR MCYST-LR DemethylMCYST-RR MCYST-RR | Нет пробы |
| Водохранилище Дрозды | 06.09.2012 | Aeruginosin 606 Aeruginosin 98-A Aeruginosin 620 Aeruginosin 89 Kasumigamide C Cyanopeptoline 885 DemethylMCYST-LF MCYST-VF MCYST-LR MCYST-RR | mcuE-9 сиквенсов aerA |

Заключение

Видовой состав цианобактерий, зарегистрированных в изученных водоемах и водотоках республики (50 представителей), и степень их количественного развития в купальные сезоны 2012–2013 гг., несомненно, могут свидетельствовать о том, что многие из них чрезвычайно широко распространены до степени «цветения» в водоемах разной степени трофности (различаясь по биомассе от 0,1–0,5 мг/л в мезотрофном оз. Нарочь, 6–8 мг/л в эвтрофных озерах Кромань и Лукомское до 107 мг/л в гипертрофных прудах и более 1 г/л в Осиповичском водохранилище) и могут продуцировать токсические вещества, оказывать негативное влияние на гидробионтов, человека и качество воды в целом.

Установлено, что токсигенные цианобактерии с высокой частотой встречаются в водоемах Беларуси. Анализ фитопланктона с помощью световой микроскопии показал, что во многих водоемах наблюдалось массовое развитие цианобактерий родов *Aphanocapsa*, *Anabaena* и *Microcystis*. Выявление в них с помощью сочетания молекулярно-биологических и аналитических методов в исследовании токсичных «цветений», использования генетических маркеров генов синтеза гепатотоксичного микроцистина, нодулярина и цилиндроспермозина, нейротоксичного сакситоксина можно считать впечатляющими результатами нашей работы. Частота токсичных «цветений» в изученных водоемах была очень высокой: 31 из 32 проб были ПЦР-положительными на ген синтеза микроцистина, 12 – на ген синтеза сакситоксина. На основании полученных молекулярно-филогенетических данных в большинстве проб, отобранных в черте г. Минска и в озерах из популярных санаторно-курортных зон страны (в 20 водоемах и водотоках), токсичными оказались представители родов *Microcystis* и *Anabaena*, способные к синтезу микроцистина. В воде методом ИФА детектированы высокие концентрации микроцистинов. В экстрактах фитопланктона наличие микроцистинов и сакситоксина в пробах было подтверждено аналитическими методами с помощью жидкостной хроматографии и масс-спектрометрии (ЖХ-МС и ВП-МАЛДИ). Обнаружено 8 типов микроцистинов и широкий спектр биологически активных веществ. В 7 водоемах обнаружены также гены синтеза сакситоксина и близкие ему варианты паралитических токсинов, такие как гониатоксины 5, 6, декарбамоилгониатоксин 2, декарбамоилсакситоксин и неосакситоксин.

Очевидно, что природоохранным органам, предприятиям, занимающимся водозабором и водоподготовкой, следует обратить внимание на эти результаты, которые говорят о необходимости введения мониторинга цианотоксинов хозяйствственно важных водоемов Беларусь, т.к. хроническая интоксикация микроцистинами приводит к тяжелым последствиям для здоровья, а сакситоксины являются высокотоксичными паралитическими ядами.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Б12Р-028 от 15.04.2012 г.

Библиографические ссылки

1. Волошко ЛН, Плющ АВ, Титова НН. Токсины цианобактерий (cyanobacteria, cyanophyta). *Альгология*. 2008;1:3–20.
2. Михеева ТМ, Белых ОИ, Сороковикова ЕГ, Гладких АС, Потапов СА и др. «Цветение» воды в городских экосистемах реки Свислочь (Беларусь) и выявление потенциально токсичных цианобактерий. *Сахаровские чтения 2011 года: экологические*

проблемы XXI века: материалы 11-й международной научной конференции, 19–20 мая 2011 г., Минск. Кундас СП, Позняк СС (редакторы). Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. с.175–176.

3. Михеева ТМ, Белых ОИ, Сороковикова ЕГ, Гладких АС, Потапов СА и др. Цианобактерии и цианотоксины в планктоне зарегулированных водохранилищ и на городском отрезке реки Свислочь (Беларусь). *Экологический вестник*. 2011;4(18):30–37.

4. Mikheyeva TM, Belykh OI, Sorokovikova EG, Gladkikh AS, Luk'yanova EV, Potapov SA, Tikhonova IV, Fedorova GA, Korneva ES, Kuzmin AV et al. Detection of microcystin-producing cyanobacteria in the Svisloch River, Belarus. *Baltic Coastal Zone*. 2012;16:131–146.

5. Белых ОИ, Гладких АС, Сороковикова ЕГ и др. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013;21:363–378.

6. Михеева ТМ. Методы количественного учета нанофитопланктона (обзор). *Гидробиологический журнал*. 1989;25:4:3–21.

7. Belykh OI, Sorokovikova EG, Fedorova GA, Kaluzhnaya OV, Korneva ES, Sakirko MV, Sherbakova TA. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (Anabaena and Microcystis) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region). *Hydrobiologia*. 2011;671:241–252.

8. Михеева ТМ, Митрахович ПА, Белых ОИ, Сороковикова ЕГ, Самойленко ВМ, Ковалевская РЗ, Дубко НВ, Лукьянова ЕВ, Кузьмин АВ, Федорова ГА, Карташевич ЗК. Фитопланктон как индикатор изменения трофического статуса и качества воды озера Кромань, подвергшегося антропогенному воздействию. *Гидробиологический журнал*. 2018;54:4:68–81.

9. Mikheyeva TM, Mitrakhovich PA, Belykh OI, Sorokovikova YeG, Samoylenko VM, Kovalevskaya RZ, Dubko NV, Lukyanova YeV, Kuzmin AV, Fedorova GA, Kartsashovich ZK. Phytoplankton as the indicator of changes in the trophic status and water quality of Lake Kroman subjected to anthropogenic load. *Hydrobiological Journal*. 2018;54(6):64–77.

10. Михеева ТМ, Адамович БВ, Жукова ТВ, Савич ИВ, Белых ОИ, Сороковикова ЕГ, Кузьмин АВ, Федорова ГА, Ковалевская РЗ, Селивончик ИН, Дубко НВ, Лукьянова ЕВ. Фитопланктон озера Большие Швакшты (Беларусь) при переходе экосистемы из макрофитного – слабоэвтрофного к фитопланктонному – гиперэвтрофному состоянию. *Сибирский экологический журнал*. 2018;6:661–676.

11. Mikheyeva TM, Adamovich BV, Zhukova TV, Savich IV, Belykh OI, Sorokovikova EG, Kuz'min AV, Fedorova GA, Kovalevskaya RZ, Selivonchik IN, Dubko NV and Luk'yanova EV. Phytoplankton of lake Bol'shie Shvakshty (Belarus) upon the transition of the ecosystem from a macrophyte – weakly eutrophic to a phytoplankton – hypereutrophic state. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018;11:6:563–575.

12. Михеева ТМ. О нахождении *Anabaenopsis raciborskii* (Wołosz.) V. Miller в Белорусской ССР и некоторые заметки о роде *Anabaenopsis* (Wołosz.) V. Miller. *Типография Карлова университета. Серия Биология*. Прага, 1968. с.257–265.

13. Выявление токсичных цианобактерий в фитопланктоне крупнейших хозяйствственно важных водоемов и водотоков России и Беларусь с оценкой их негативного влияния на качество воды. Отчет о научно-исследовательской работе. Договор с БРФФИ № Б12Р-028 от 15.04.2012, № гос. регистрации 20122473. Минск, 2014. 79 с.

14. Михеева ТМ, Лукьянова ЕВ. Планктонные цианопрокариоты в системе Нарочанских озер на разных этапах эволюции их трофического статуса. *Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III Международной научной конференции, 17–22 сентября 2007 г., Минск–Нарочь / Белорусский государственный университет; Михеева ТМ (составитель и редактор). Минск: Издательский центр БГУ, 2007;65–66.*

15. Vincent WF. Cyanobacteria. In: Likens GE (ed.). *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford (UK): Elsevier, 2009;3:226–232.

16. Skulberg OM. Taxonomy of toxic Cyanophyceae (Cyanobacteria). *Algal toxins in seafood and drinking water*. London: Acad. Press, 1993. p. 145–164.

17. Белякова РН, Волошко ЛН, Гаврилова ОВ и др. *Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России*. Москва, 2006. 367 с.

18. Havens KH. Chapter 33: Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. In: Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs. *Advances in experimental medicine and biology*. 2008;619:733–747.

19. Сиренко ЛА, Козицкая ВН. Биологически активные вещества водорослей и качество воды. Киев, 1988. 256 с.

20. Орлов БН, Гелашвили ДБ, Ибрагимов АК. *Ядовитые животные и растения СССР: Справочное пособие для студентов вузов по специальности «Биология»*. Москва: Высшая школа, 1990. 272 с.

21. Graham JL, Jones JR, Jones SB et al. Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States. *Water Research*. 2004;38:4395–4404.

References

1. Woloshko LN, Pljushch AW, Titova NN. Toxins of cyanobacteria (Cyanobacteria, Cyanophyta)]. *Algologia*. 2008;1:3–20. Russian.
2. Mikheyeva TM, Belykh OI, Sorokovikova EG, Gladkikh AS, Potapov SA, etc. «Water bloom» in city's ecosystems of the River Svisloch (Belarus) and detection of the potential toxic of cyanobacteria. *Sakharovskije tchenija 2011 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 11 mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, 19–20 maja 2011, Minsk* [Sakharov's studies of 2011: environmental problems of the Central Agricultural Institute of the century: materials of the 11th international scientific conference, 2011 May 19–20, Minsk] Kundasa SP, Pozniak SS (Eds.). Minsk: ISEU named after A. D. Sakharov, 2011. p.175–176. Russian.
3. Mikheyeva TM, Belykh OI, Sorokovikova EG, Gladkikh AS, Potapov SA, etc. Cyanobacteria and cyanotoxins in plankton of the regulated reservoirs and on the city's section of River Svisloch (Belarus). *Ekologicheskij Vestnik*. 2011;4(18):30–37. Russian.
4. Mikheyeva TM, Belykh OI, Sorokovikova EG, Gladkikh AS, Luk'yanova EV, Potapov SA, Tikhonova IV, Fedorova GA, Korneva ES, Kuzmin AV et al. Detection of microcystin-producing cyanobacteria in the Svisloch River, Belarus. *Baltic Coastal Zone*. 2012;16:131–146.
5. Belykh OI, Gladkikh AS, Sorokovikova EG, Potapov SA, etc. Microcystin-producing cyanobacteria in waterbodies of Russia, Belarus and Ukraine. *Chemistry for Sustainable Development*. 2013;21:363–378. Russian.
6. Mickheyeva T. M. Methods of quantitative accounting of nanophytoplankton (review). *Hydrobiological journal*. 1989;25:4:3–21. Russian.
7. Belykh OI, Sorokovikova EG, Fedorova GA, Kaluzhnaya OV, Korneva ES, Sakirko MV, Sherbakova TA. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (Anabaena and Microcystis) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region). *Hydrobiologia*. 2011;671:241–252.

8. Mikheyeva T.M, Mitrarhovitch PA, Belykh OI, Sorokovikova EG., Samojlenko VM, Kovalevskaja RZ, Dubko NV, Luk'yanova EV, Kuzmin AV, Fedorova GA, Kartashevitch ZK. *Fitoplankton kak indicator izmenenija troficheskogo statusa ikatchestva vody ozera Kroman', podvergshego antropogennomu vozdejstviju* [Phytoplankton as the indicator of changes in the trophic status and water quality of Lake Kroman subjected to anthropogenic load]. *Hydrobiological journal*. 2018;54:4:68–81. Russian.
9. Mikheyeva TM, Mitrakhovich PA, Belykh OI, Sorokovikova YeG, Samoylenko VM, Kovalevskaya RZ, Dubko NV, Lukyanova YeV, Kuzmin AV, Fedorova GA, Kartashevich ZK. Phytoplankton as the indicator of changes in the trophic status and water quality of Lake Kroman subjected to anthropogenic load. *Hydrobiological Journal*. 2018;54(6):64–77.
10. Mikheyeva TM, Adamovich BV, Zhukova TV, Savich IV, Belykh OI, Sorokovikova EG, Kuz'min AV, Fedorova GA, Kovalevskaya RZ, Selivonchik IN, Dubko NV, Luk'yanova EV. *Fitoplankton ozera Bol'shie Shvakshty (Belarus) pri perechode ekosistemy iz makrofitnogo – slaboevtrofного k fitoplanktonnomu – hiperevtrofному sostojaniju* [Phytoplankton of lake Bol'shie Shvakshty (Belarus) upon the transition of the ecosystem from a macrophyte – weakly eutrophic to a phytoplankton – hypereutrophic state]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2018;6:661–676. Russian.
11. Mikheyeva TM, Adamovich BV, Zhukova TV, Savich IV, Belykh OI, Sorokovikova EG, Kuz'min AV, Fedorova GA, Kovalevskaya RZ, Selivonchik IN, Dubko NV and Luk'yanova EV. Phytoplankton of lake Bol'shie Shvakshty (Belarus) upon the transition of the ecosystem from a macrophyte – weakly eutrophic to a phytoplankton – hypereutrophic state. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018;11:6:563–575.
12. Mikheyeva T. M. *O nakhozheniji Anabaenopsis raciborskii (Wołosz.) V. Miller v Beloruskoj SSR i nekotoryje zametki o rode Anabaenopsis (Wołosz.) V. Miller* [On the detection of *Anabaenopsis raciborskii* (Wołosz.) V. Miller in Belarus and some remarks about the genus *Anabaenopsis* (Wołosz.) V. Miller]. Tr. Univerzita Karlova. Biology Series. Praha. 1968. p. 257–265. Russian.
13. *Vyjavlenije toksichnykh cyanobacterij v fitoplanktone krupnejshikh kozhajstvenno-vazhnykh vodojemov i vodotokov Rossii i Belarusi s otsenkoj ikh negativnogo vlijanija na katchestvo vody*. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. [The detection of toxic cyanobacteria in phytoplankton of the biggest economically important water bodies and watercourses of Russia and Belarus with assessment of their negative influence on water quality. Research report]. Agreement with the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research № Б12Р-028 of 2012 April 15. Reg. № 20122473.g. Minsk, 2014. 79 p. Russian.
14. Mikheyeva TM, Luk'yanova EV, *Planktonnye cyanoprokarioty v sisteme Narochanskikh ozer na raznykh etapakh evoljuziji ikh troficheskogo statusa* [Plankton cyanobacteria in the Naroch lakes system on the different stages of their trophic status evolution]. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie prozessy, antropogennaja transformacija, katchestvo vody: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, 17–22 sentyabrya 2007, Minsk–Naroch* [Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, water quality: Proceedings of the III International Scientific Conference, 2007 September 17–22, Minsk–Naroch]. Mikheyeva TM (Compilation and edition). Minsk: Izdatel'skij Centr BGU = BSU Publishing Center, 2007. p. 65–66. Russian.
15. Vincent WF. Cyanobacteria. In: Likens GE (ed.). *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford (UK): Elsevier, 2009;3:226–232.
16. Skulberg O. M. Taxonomy of toxic *Cyanophyceae* (Cyanobacteria). *Algal toxins in seafood and drinking water*. London: Academic Press/Elsevier, 1993. p. 145–164.
17. Beljakova RN, Woloshko LN, Gavrilova OV, etc. *Vodorosli, vyzvajushchie «Tsvetenie» vodojemov Severo-Zapada Rossii* [The algae causing of «water bloom» in waterbodies of the Russia North-West]. Moscow, 2006. 367 p. Russian.
18. Havens KH. Chapter 33: Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. In: *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs. Advances in experimental medicine and biology*. 2008;619:733–747.
19. Sirenko LA, Kozitskaja VN. *Biologicheski-aktivnye veschestva vodoroslej I katchestvo vody* [Biological active substances of the algae and water quality]. Kiev, 1988. 256 p. Russian.
20. Orlov BN, Helashvili DB, Ibrahimov AK. *Jadovitye zhivotnye i rastenija SSSR. Spravochnoje posobije dlja studentov vuzov po spezialnosti «Biologija»* [Poison animals and plants of USSR. A reference book for university students in the specialty “Biology”]. Moscow: Vyschaja shkola, 1990. 272 p. Russian.
21. Graham JL, Jones JR, Jones SB et al. Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Mid-western United States. *Water Research*. 2004;38:4395–4404.

Статья поступила в редакцию 04.11.2020.
Received by editorial board 04.11.2020.