

Оригинальная статья

УДК 581.5+574.583

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-388-399>

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

Т. В. Дрозденко ^{1✉}, С. М. Александрова ¹, Т. К. Антал ¹, Е. И. Тихомирова ²

¹ Псковский государственный университет

Россия, 180000, г. Псков, пл. Ленина, д. 2

² Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Поступила в редакцию 16.09.2022 г., после доработки 27.10.2022 г., принята 10.11.2022 г.

Аннотация. Исследовались цианобактериальные сообщества Псковского озера в разные сезоны 2021 г. и проведено сравнение с данными 2018 – 2020 годов. Получены сведения о таксономическом составе и количественных характеристиках цианобактерий, показаны виды, токсичные для живых организмов. Всего на четырех постоянных станциях озера зарегистрировано 196 видовых таксонов фитопланктона, 15.8% из которых приходилось на цианобактерии. Наиболее сходными в видовом отношении были цианобактериальные сообщества в летний и осенний периоды. Количественные показатели цианобактерий, такие как численность и биомасса, были минимальными в весенний период, максимальными – в летне-осенний. В каждый из исследованных сезонов года среди обнаруженных цианобактерий присутствовали токсичные и потенциально токсичные виды, принадлежащие родам *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Nostoc*. Суммарный вклад представителей данных родов в общую численность фитопланктона изменялся от 4.0% весной до 65.0% осенью. В летний период на долю цианобактерий из вышеперечисленных родов в общей численности микроводорослей приходилось около 40.0%. Наибольшая роль отмечена для водоросли *Microcystis aeruginosa* (Kützinger) Kützinger, которая вызывает «цветение» водоемов, а также продуцирует токсин микроцистин, обладающий гепатотоксичностью. Исследование Псковского озера требует постоянного мониторинга содержания цианотоксинов, особенно в осенний период, когда наблюдается максимальное по биомассе содержание цианобактерий, в том числе токсичных видов, что может привести к серьезным последствиям. **Ключевые слова:** водные экосистемы, фитопланктон, экологический мониторинг, цианобактериальные сообщества, токсины, цветение воды, эвтрофикация

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-64-46018).

Для цитирования. Дрозденко Т. В., Александрова С. М., Антал Т. К., Тихомирова Е. И. Структурные показатели и токсичные виды цианобактерий Псковского озера // Поволжский экологический журнал. 2022. № 4. С. 388 – 399. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-388-399>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория комплексных экологических исследований Псковского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Дрозденко Татьяна Викторовна: <https://orcid.org/0000-0002-5553-2296>, tboichuk@mail.ru; Александрова Светлана Михайловна: <https://orcid.org/0000-0002-8524-3997>, superkandidat@rambler.ru; Антал Тарас Корнелиевич: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8034>, taras_an@mail.ru; Тихомирова Елена Ивановна: <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>, tichomirova_ei@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Цианобактерии – важнейший элемент биосферы, которые, развиваясь в составе наземных, пресноводных или морских сообществ, увеличивают уровень их продуктивности (Громов, 1996; Rastogi et al., 2015). Цианобактерии могут быстро накапливать биомассу, что связано с их способностью к фиксации азота и широкой экологической пластичностью. Среди цианобактерий есть виды, вызывающие «цветение» воды или сопутствующие «синезеленым цветениям». Вспышке развития цианобактерий способствует эвтрофирование водоемов, а также постоянное повышение температуры среды обитания (Белякова и др., 2006; Чернова и др., 2017; Paerl and Huisman, 2009). «Цветение» воды является мощным стрессором для водных экосистем и влечет за собой негативные последствия при рекреационном, хозяйственном и питьевом использовании водоемов (Степанова и др., 2012). Кроме того, некоторые виды цианобактерий способны образовывать токсичные вещества – цианотоксины, что при их массовом развитии представляет огромную угрозу живым организмам, в том числе и человеку (Волошко и др., 2008; Rastogi et al., 2014). Возрастающее антропогенное загрязнение гидросферы способствует массовому развитию токсичных микроводорослей. Среди цианотоксинов выделяют нейротоксины, которые поражают нервную систему; цитотоксины, препятствующие синтезу белка; гепатотоксины, действующие на печень и ряд внутренних органов (Sivonen, 1996).

Известно 46 видов цианобактерий, способных вырабатывать токсичные метаболиты, большинство из которых являются планктонными формами. Среди микроорганизмов, вызывающих «цветение» воды и продуцирующих токсины, в первую очередь рассматривают роды *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Anabaenopsis*, *Nodularia* и *Oscillatoria* (Громов, 1996; Белякова, 2004; Воякина и др., 2020). Псковское озеро – крупное пресноводное озеро бассейна Балтийского моря площадью 709 км², является южной составляющей трансграничного Чудско-Псковского озерного комплекса. Озеро слабо минерализованное, характеризуется мелководностью (средняя глубина – 3 м) и эвтрофностью, является проточным, сюда впадает более десяти рек и ручьев. В ихтиофауне Псковского озера доминируют теплолюбивые виды рыб: лещ, щука, плотва и др. (Псковско-Чудское озеро, 2022). Озеро имеет низкую прозрачность (до 2.5 м) и подвергается эвтрофикации в течение уже полувека (Воякина и др., 2020).

В настоящее время «цветет» большинство водоемов Северо-Запада России (Белякова и др., 2006) и Псковское озеро – не исключение. Учитывая потенциальный вред ряда цианобактерий для здоровья человека, изучение цианобактериальных сообществ в водных объектах на региональном уровне приобретает особую актуальность.

Цель данной статьи – оценка структурных показателей цианобактерий Псковского озера, а также выявление доминирующих и токсичных видов в цианобактериальном сообществе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в вегетационный период 2021 г. (май, август, октябрь) на четырех постоянных станциях (Ст.) Псковского озера (рисунок). Отбор проб осуществляли общепринятым методом (Садчиков, 2003).

Пробы фиксировали 40% раствором формалина, концентрировали до 5 – 10 мл и просматривали с помощью микроскопа «Axio Lab A1» (Carl Zeiss, Германия). Виды идентифицировали, используя ряд определителей, указанных ранее (Дрозденко, Антал, 2021). Информацию о токсичности тех или иных видов цианобактерий брали из доступных литературных источников и интернет-ресурсов.

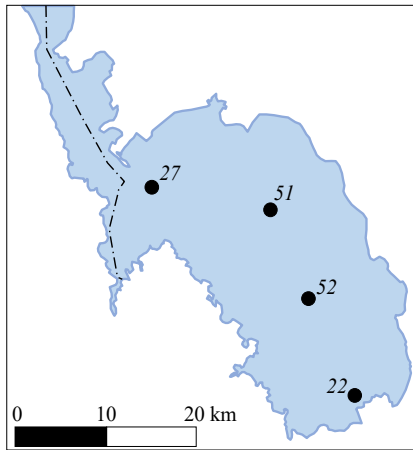
Количественный анализ проводили с использованием камеры Нажотта (0.05 мл). Численность клеток фитопланктона рассчитывали по общеизвестной формуле (Садчиков, 2003), биомассу вычисляли по объемам водорослей, определенных методом геометрического подобия (Кузьмин, 1984).

Доминирующими по численности считали те виды цианобактерий, количество которых в общей численности фитопланктона составляло более 10%. Для сравнения видового состава цианобактериальных сообществ в разные сезоны года использовали индекс флористического сходства Сьеренсена–Чекановского (Шмидт, 1980).

Подготовительную обработку и анализ данных проводили в приложении Microsoft Office Excel 2010 (Microsoft Corp.), статистические расчеты выполнены с использованием программы STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таксономический состав фитопланктона. За вегетационный период 2021 г. в Псковском озере обнаружено 196 видовых таксонов водорослей из 8 отделов:



Карта-схема расположения станций отбора проб в Псковском озере

Figure. Schematic map of the location of the sampling stations in Pskov Lake

Bacillariophyta (74), Chlorophyta (54), Cyanobacteria (31), Ochrophyta (16), Cryptophyta (9), Euglenophyta (6), Dinophyta (5), Charophyta (1). По представленности видами доминировал отдел Bacillariophyta, содержащий 37.8% от общего числа видовых таксонов фитопланктона. Далее следовал отдел Chlorophyta, на который в общем видовом богатстве приходилось 27.6%. Отдел Cyanobacteria был представлен 31 видовым таксоном, что составило 15.8% от общего числа видов микроводорослей. Около 8% приходилось на представителей охрофитовых водорослей. Остальные отделы содержали меньшее количество видов водорослей. Полученные результаты сопоставимы с данными предыдущих лет исследований. Так, в 2018 и 2020 гг. в планктонной альгофлоре Псковского озера было зарегистри-

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

ровано, соответственно, 191 и 201 видовых и внутривидовых таксонов микроводорослей. В 2018 г. на цианобактерии в видовом богатстве приходилось 15.2%, в 2020 г. – 17.4%.

В весенний период 2021 г. было зарегистрировано больше всего видовых таксонов цианобактерий: 21 из 12 родов (табл. 1). Наиболее богатыми видами были род *Aphanocapsa* и род *Chroococcus*, содержащие по 4 видовых таксона.

Таблица 1. Доля цианобактерий в общем видовом составе фитопланктона

Table 1. Share of cyanobacteria in the total specific composition of phytoplankton

Всего видов / Total species	Май / May		Август / August		Октябрь / October	
	Абс. / Abs.	%	Абс. / Abs.	%	Абс. / Abs.	%
Фитопланктон / Phytoplankton	132	100	117	100	107	100
Цианобактерии / Cyanobacteria	21	15.9	20	17.1	17	15.9

Летом обнаружено 20 видовых таксонов цианей, относящихся к 9 родам, наиболее богатыми из которых были *Aphanocapsa*, *Microcystis* (по 4 вида) и *Aphanothece* (3 вида).

Осенью отмечено 17 видовых таксонов цианобактерий из 11 родов, что составляло порядка 16 % от общего количества фитопланктона. Числом видов отличались род *Aphanocapsa* (4 вида) и род *Microcystis* (3 вида).

Согласно рассчитанному индексу Сьеренсена–Чекановского сходство цианобактериальных сообществ в сравниваемые сезоны было выше среднего и составляло 53 – 64%. Наиболее близкими видами были летние и осенние цианобактериальные сообщества (12 общих видов).

Количественный анализ фитопланктона. Средние показатели численности фитопланктона выросли к концу вегетационного периода более, чем в 7 раз: с 2.2 млн кл./л в мае до 16.2 млн кл./л в октябре. Подобная тенденция наблюдалась и при оценке содержания цианобактерий в общей численности: меньше всего цианобактерий было весной – 38.4%, больше всего осенью – 75.1% (табл. 2).

Таблица 2. Доля цианобактерий в общей численности фитопланктона

Table 2. Share of cyanobacteria in the total abundance of phytoplankton

Показатели / Indicators	Ст. 22 / St. 22	Ст. 52 / St. 52	Ст. 51 / St. 51	Ст. 27 / St. 27	Среднее / Average
1	2	3	4	5	6
Май / May					
$N_{\text{общ.}} \text{ тыс. кл./л} / N_{\text{tot.}} \text{ thousand cells/L}$	1594.3	2933.3	2200.0	2229.1	2239.2±474.2
$N_{\text{циан.}} \text{ тыс. кл./л} / N_{\text{cyan.}} \text{ thousand cells/L}$	120.4	433.3	1637.2	1266.6	864.3±706.7
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	7.6	14.8	74.4	56.8	38.4±21.0
Август / August					
$N_{\text{общ.}} \text{ тыс. кл./л} / N_{\text{tot.}} \text{ thousand cells/L}$	3755.5	7285.9	13548.9	3260.8	6962.8±4107.0
$N_{\text{циан.}} \text{ тыс. кл./л} / N_{\text{cyan.}} \text{ thousand cells/L}$	2995.5	4802.2	10187.2	1447.8	4858.1±3807.9
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	79.6	65.9	75.2	44.4	66.3±13.6

Окончание табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3	4	5	6
Октябрь / October					
$N_{\text{общ.}}$, тыс. кл./л / N_{tot} , thousand cells/L	5600.0	9144.0	36552.0	13544.0	16210±12076.9
$N_{\text{циан.}}$, тыс. кл./л / $N_{\text{cyan.}}$, thousand cells/L	4368.0	5184.0	30696.0	1105.6	10338.4±13685.6
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	78.0	56.7	84.0	81.6	75.1±10.8

В предыдущий год исследования наблюдалась следующая картина: доля цианобактерий в планктонной альгофлоре была минимальна в мае и составляла около 60.0%. В августе содержание цианей в общей численности возросло до 91.5%, а в октябре немного снизилось до 78.0%.

Анализ по станциям показал, что весной на Ст. 22 в общей численности микрородорослей содержание цианобактерий не доходило до 10%, количество которых увеличилось в летне-осенний сезон более, чем в 10 раз. На Ст. 52 в течение всего исследования на долю цианобактерий в численности приходилось 74.4 – 84.0% с максимальными показателями в осенний период наблюдений (см. табл. 2).

Как и при исследованиях, проведенных в Псковском озере в 2017 – 2018 гг. (Воякина и др., 2020), а также в 2020 г., при вегетации цианобактерий в 2021 г. отмечены невысокие значения биомассы при высоких показателях численности за счет доминирования в планктоне мелкоразмерных видов цианей.

Минимальные значения биомассы фитопланктона отмечались в весенний период и в среднем по станциям составляли 1.2 мг/л. На Ст. 51 при самом низком, по сравнению с другими станциями, значении биомассы фитопланктона (344.7 мкг/л), доля цианобактерий была наибольшей – порядка 5.0% (табл. 3). Среднее содержание цианобактерий в общей биомассе составило 2.3%.

Таблица 3. Доля цианобактерий в общей биомассе фитопланктона

Table 3. Share of cyanobacteria in the total phytoplankton biomass

Показатели / Indicators	Ст. 22 / St. 22	Ст. 52 / St. 52	Ст. 51 / St. 51	Ст. 27 / St. 27	Среднее / Average
Май / May					
В общей биомассе, мг/л / In total biomass, mg/L	1.0	2.4	0.3	1.1	1.2±0.8
Цианобактерии, мкг/л / Cyanobacteria, µg/L	14.0	6.9	17.1	27.3	16.3±8.5
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	1.5	0.3	5.0	2.3	2.3±2.0
Август / August					
В общей биомассе, мг/л / In total biomass, mg/L	1.3	11.3	11.0	4.4	7.0±5.0
Цианобактерии, мкг/л / Cyanobacteria, µg/L	45	112.3	390.1	97.8	161.3±155.2
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	3.6	1.0	3.5	2.2	2.6±1.2
Октябрь / October					
В общей биомассе, мг/л / In total biomass, mg/L	0.9	3.3	6.9	2.5	3.4±2.5
Цианобактерии, мкг/л / Cyanobacteria, µg/L	123.1	132.3	834.3	554.2	410.9±346.5
Доля цианей, % / Share of cyanobacteria, %	13.1	4.0	12.1	21.8	12.7±7.3

В августе зарегистрирована самая высокая биомасса первичных продуцентов пелагиали (7.0 мг/л), которая в зависимости от станции изменялась в пределах

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

1.3 – 11.3 мг/л. Однако доля цианобактерий в общей биомассе в среднем не превышала 2.6% и была сопоставима с биомассой в весенний период.

В октябре содержание цианобактерий в общей биомассе возросло до 12.7%, но средняя биомасса фитопланктона на исследованной акватории была почти в 2 раза меньше, чем в летний сезон. Наибольший вклад в биомассу фитопланктона цианеи вносили на Ст. 27 – 21.8% (табл. 4).

Таблица 4. Доминирующие виды цианобактерий в Псковском озере

Table 4. Dominant species of cyanobacteria in Pskov lake

№ станции / Station number	Видовой таксон / Species taxon	Численность, тыс. кл./л / Number, thousand cells/L	% от общей чис- ленности циа- нобактерий / % of total cyanobacteria	% цианобактерий от общей численности фитопланктона / % of cyanobacteria of the total phytoplankton abundance
1	2	3	4	5
Май / May				
22	<i>Microcystis aeruginosa</i>	73.9	61.4	4.6
	<i>Nostoc linckia</i>	34.7	28.9	2.2
52	<i>Microcystis pulverea</i>	238.1	54.9	8.1
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	190.5	44.0	6.5
51	<i>Woronichinia compacta</i>	511.6	31.3	23.3
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	465.1	28.4	21.1
	<i>Snowella lacustris</i>	372.1	22.7	16.9
	<i>Aphanothece</i> sp.	186.0	11.4	8.5
27	<i>Woronichinia compacta</i>	1083.3	85.5	48.6
Август / August				
22	<i>Aphanocapsa holsatica</i>	1022.2	34.1	27.2
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	844.4	28.2	22.5
	<i>Aphanocapsa incerta</i>	666.7	22.3	17.8
52	<i>Microcystis aeruginosa</i>	2093.0	43.6	28.7
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	907.0	18.9	12.4
	<i>Microcystis</i> sp.	697.7	14.5	9.6
	<i>Aphanothece</i> sp.	627.9	13.1	8.6
51	<i>Microcystis aeruginosa</i>	3531.9	34.7	26.1
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	1702.1	16.7	12.6
	<i>Aphanothece bachmanii</i>	1702.1	16.7	12.6
	<i>Microcystis pulverea</i>	1276.6	12.5	9.4
27	<i>Microcystis aeruginosa</i>	1108.7	76.6	34.0
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	326.1	22.5	10.0
Октябрь / October				
22	<i>Microcystis aeruginosa</i>	2400.0	55.0	42.9
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	760.0	17.4	13.6
	<i>Aphanothece</i> sp.	600.0	13.7	10.7
52	<i>Microcystis aeruginosa</i>	1920.0	37.0	21.0
	<i>Microcystis pulverea</i>	1600.0	30.9	17.5
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	880.0	17.0	9.6
51	<i>Microcystis aeruginosa</i>	14000.0	45.6	38.3
	<i>Microcystis pulverea</i>	9600.0	31.3	26.3
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	3840.0	12.5	10.5

Окончание табл. 4
Table 4. Continuation

1	2	3	4	5
27	<i>Microcystis aeruginosa</i>	6160.0	55.7	45.5
	<i>Microcystis pulverea</i>	1600.0	14.5	11.8
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	1280.0	11.6	9.5
	<i>Microcystis</i> sp.	1120.0	10.1	8.3

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены доминирующие виды.

Note. The dominant species are highlighted in bold.

Содержание цианобактерий в общей биомассе фитопланктона в 2020 г., как и в 2021 г., увеличивалось от весны (2.4%) к осени (5.0%), однако было более низким в конце вегетационного периода.

Доминирующие виды цианобактерий Псковского озера. Весной из представленных доминант цианобактериальных сообществ в общей численности отличались высоким содержанием такие цианобактерии, как *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák, *Aphanocapsa delicatissima* West & G. S. West, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák (на ст. 51) и *W. compacta* на Ст. 27, на долю которой приходилось 48.5% от общей численности планктонных водорослей (см. табл. 4).

Ранее отмечалось, что цианобактерии родов *Aphanocapsa* и *Woronichinia* играли наибольшую роль в планктонной альгофлоре Псковско-Чудского озера (Воякина и др., 2020).

В летний период в зависимости от станции исследования в общей численности фитопланктона на цианобактерии-доминанты приходилось 10.0 – 34.0%. Среди видов, вносящих наибольший вклад в численность летнего фитопланктона, отмечались цианобактерии из родов *Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Microcystis* (см. табл. 4). Известно, что представители родов *Aphanocapsa* и *Aphanothece* широко распространены в умеренной зоне и в летне-осенний период являются массовыми, встречаясь при «цветении» видов *Microcystis* (Белякова, 2004; Белякова и др., 2006).

Осенью на всех станциях исследования максимальный вклад в общую численность планктонных микроводорослей вносила цианобактерия *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing (21.0 – 45.5%), которая, помимо того, что является обычным возбудителем «цветения» воды, часто продуцирует цианотоксин микроцистин, представляя серьезную проблему для здравоохранения и окружающей среды (Белякова, 2004; Белякова и др., 2006; Tanabe et al., 2018).

В 2020 г. наблюдалась несколько иная картина среди цианобактериальных видов-доминантов. Так, доминирующая в мае 2021 г. *Woronichinia compacta* весной 2020 г. среди доминант не отмечалась, зато она количественно превалировала на всех станциях в летне-осенний период, составляя 16.3 – 47.5% от общей численности фитопланктона. Весной 2020 г., помимо представителей родов *Aphanocapsa* и *Snowella*, на Ст. 52 заметный вклад в численность планктонной альгофлоры вносила цианобактерия *Coelosphaerium kuetzingianum* Nägeli (14.5%), не встречавшаяся в 2021 г. Стоит отметить, что доминирующий во все сезоны 2021 г. вид *Microcystis aeruginosa* не вносил заметный вклад в численность цианобактерий

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

в предыдущий год. Только в августе 2020 г. на Ст. 27 среди доминант отмечался представитель рода *Microcystis* – *Microcystis pulverea* (H. C. Wood) Forti, который летом 2021 г. выступал в роли субдоминанта. В 2020 г. среди доминант во все сезоны отмечались представители рода *Aphanocapsa*, как и в 2021 г.

Токсичные виды цианобактерий Псковского озера. Для пресных водоемов в большей степени актуальны нейротоксины (сакситоксины, анатоксины) за счет высокой токсичности и гепатотоксины (микроцистины) из-за их высокой стабильности и распространенности (Чернова и др., 2017).

За период исследований в водоеме Псковского озера обнаружен 31 видовой таксон цианобактерий из 16 родов. Среди них потенциально токсичными и токсичными являются 6 родов (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Nostoc*), что составляет 38% от числа обнаруженных родов цианобактерий.

Цианобактерии из родов *Anabaena*, *Microcystis*, *Nostoc* продуцируют микроцистины (MC) – одни из самых широко распространенных цианотоксинов в пресных водоемах, характеризующихся гепатотоксичностью. Представители данных родов достаточно часто вызывают токсичное «цветение» воды в продуктивных водоемах по всему миру (Белых и др., 2013). В 2017 г. в Псковском озере содержание микроцистинов увеличилось от 0.03 мкг/л в июле до 0.22 мкг/л в августе (Воякина и др., 2020). Согласно рекомендациям ВОЗ, концентрация MC-LR в питьевой воде не должна превышать 1 мкг/л при однократном применении и 0.1 мкг/л для многократного применения. При использовании водоемов в рекреационных целях опасна численность цианобактерий 20×10^6 кл./л и концентрация MC 2 – 4 мкг/л. Для человека LD₅₀ варьирует от 0.05 до 1.2 мг/кг массы тела (эксперименты на мышах при внутрибрюшном введении) (Guidelines ..., 2003).

Среди зарегистрированных родов цианобактерий также способны выделять гепатотоксины *Anabaena* и *Aphanizomenon* (цилиндроспермозин), *Nodularia* (нодулярины).

Нейротоксины продуцируют некоторые представители родов *Anabaena*, *Aphanizomenon* и *Lyngbya* (анатоксин-α, гомоанатоксин-α, сакситоксины). В ходе недавних исследований Псковского озера нейротоксины в пробах воды обнаружены не были (Воякина и др., 2020). Это свидетельствует о том, что численность цианобактерий, вырабатывающих нейротоксины, в настоящий момент недостаточно высока для их диагностирования в водной среде (либо они вырабатываются в малом количестве).

Дерматотоксины и цитотоксины способны образовывать представители из рода *Lyngbya* (лингбиатоксин-α и аплисиатоксины).

Во все исследуемые сезоны года практически на всех станциях исследования встречаются микроорганизмы родов *Microcystis*, способные вызывать цианобактериальные «цветения» водоемов с дальнейшими негативными для живых организмов последствиями. Известно, что во время «цветения» водоемов концентрация токсинов в воде сильно увеличивается на стадии отмирания цианобактериальных популяций, лизиса клеток и выхода из них токсинов (Белых и др., 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы цианобактериальные сообщества Псковского озера за вегетационный период 2021 г. Флористический комплекс планктонной альгофлоры озера характеризовался как диатомово-хлорофитово-цианобактериальный. Из 196 обнаруженных видовых таксонов фитопланктона около 16% приходилось на цианобактерии. Среди доминирующих по численности цианобактерий в фитопланктонном сообществе во все сезоны наблюдений отмечались представители родов *Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Microcystis*. Стоит отметить, что в предыдущий год водоросли рода *Microcystis* среди доминант отмечались единожды – летом. Весной ощутимый вклад в общую численность вносила также *Woronichinia compacta*, которая в 2020 г. отмечалась среди доминант в летне-осенний период. Содержание цианобактерий в общей численности фитопланктона (по количеству клеток) увеличивалось от 38.4 в мае до 75.1% в октябре, в общей биомассе – от 2.8 до 12.7% соответственно, что соответствует вегетационной активности данной группы организмов. Полученные результаты сопоставимы с результатами прошлых лет.

Среди идентифицированных микроорганизмов потенциально токсичными и токсичными являлись 6 родов: *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Nostoc*. Суммарный вклад представителей данных родов в общую численность фитопланктона был минимальным весной и составлял 4.0%, максимальным осенью – порядка 65.0%. В летний период на долю цианобактерий из выше-названных родов в общей численности микроводорослей приходилось около 40.0%. Наибольшая роль принадлежала роду *Microcystis*, в частности, водоросли *Microcystis aeruginosa* (Kützinger) Kützinger, которая вызывает «цветение» водоемов, а также является токсичной водорослью, продуцирующей микроцистин, обладающий гепатотоксичностью. Известно, что разнообразие и концентрации цианотоксинов связаны с составом доминирующих видов цианобактерий и уровнем их вегетации (Воякина и др., 2020).

Исследование Псковского озера требует постоянного мониторинга содержания цианотоксинов, особенно в осенний период, когда наблюдается максимальное по биомассе содержание цианобактерий, в том числе токсичных видов, так как неконтролируемый рост численности цианобактерий может привести к серьезным последствиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белякова Р. Н. Виды родов *Aphanocapsa* и *Microcystis* (Cyanoprokaryota), вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России // Новости систематики низших растений. 2004. Т. 37. С. 8 – 21.
- Белякова Р. Н., Волошко Л. Н., Гаврилова О. В., Гогорев Р. М., Макарова И. В., Око-лодков Ю. Б., Рундина Л. А. Водоросли, вызывающие «цветение» в водоемах Северо-Запада России. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2006. 368 с.
- Белых О. И., Гладких А. С., Сорокикова Е. Г., Тихонова И. В., Потанов С. А., Федорова Г. А. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины // Химия в интересах устойчивого развития. 2013. Т. 21, № 4. С. 363 – 378.
- Волошко Л. Н., Плющ А. В., Титова Н. Н. Токсины цианобактерий (Cyanophyta) // Альгология. 2008. Т. 18, № 1. С. 3 – 21.

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Воякина Е. Ю., Русских Я. В., Чернова Е. Н., Жаковская З. А. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 124 – 129. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-124-129>

Громов Б. В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 33 – 39.

Дрозденко Т. В., Антал Т. К. Оценка качества воды устья реки Великой по показателям фитопланктона // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. 2021. № 1. С. 51 – 60. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-1-51-60>

Кузьмин Г. В. Таблицы для вычисления биомассы водорослей. Магадан : ДВНЦ АН СССР, 1984. 47 с.

Псковско-Чудское озеро // Рыбы и озера Псковской области. Псков, 2022. URL: http://pskovfish.ru/ozero-sp/ozera_pskovsko_chydsкое.htm (дата обращения: 25.06.2022).

Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М. : Университет и школа, 2003. 157 с.

Степанова Н. Ю., Халиуллина Л. Ю., Никитин О. В., Латыпова В. З. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоемов Казанского региона // Вода: химия и экология. 2012. № 11. С. 67 – 72.

Чернова Е. Н., Русских Я. В., Жаковская З. А. Токсичные метаболиты сине-зелёных водорослей и методы их определения // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4, вып. 4. С. 440 – 473. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.408>

Шмидт В. М. Статистические методы в сравнительной флористике. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 176 с.

Paerl H. W., Huisman J. Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms // Environmental Microbiology Reports. 2009. Vol. 1, iss. 1. P. 27 – 37. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>

Rastogi R. P., Sinha R. P., Incharoensakdi A. The cyanotoxin-microcystins: Current overview // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2014. Vol. 13, iss. 2. P. 215 – 249. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9334-6>

Rastogi R. P., Madamwar D., Incharoensakdi A. Bloom dynamics of Cyanobacteria and their toxins: Environmental health impacts and mitigation strategies // Frontiers in Microbiology. 2015. Vol. 6. Article number 1254. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01254>

Sivonen K. Cyanobacterial toxins and toxin production // Phycologia. 1996. Vol. 35, suppl. 6. P. 12 – 24. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-35-6S-12.1>

Tanabe Y., Hodoki Y., Sano T., Tada K., Watanabe M. M. Adaptation of the freshwater bloom-forming cyanobacterium microcystis aeruginosa to Brackish water is driven by recent horizontal transfer of sucrose genes // Frontiers in Microbiology. 2018. Vol. 9. Article number 1150. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01150>

Guidelines for Safe Recreational Water Environments. Vol. 1: Coastal and Fresh Waters. Geneva : World Health Organization, 2003. 219 p.

Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake

T. V. Drozdenko ^{1✉}, S. M. Aleksandrova ¹, T. K. Antal ¹, E. I. Tikhomirova ²

¹ Pskov State University

2 Lenin Square, Pskov 180000, Russia

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410054, Russia

Received: 16 September 2022 / revised: 27 October 2022 / accepted: 10 November 2022

Abstract. The cyanobacterial communities of Lake Pskov were studied in several seasons of 2021, and a comparison was made with the data of earlier studies. Data on the taxonomic composition and quantitative characteristics of cyanobacteria have been obtained, and some species toxic to living organisms are shown. 196 species taxa of phytoplankton in total were recorded at four permanent stations of the lake, 15.8% of which were cyanobacteria. The cyanobacterial communities were most similar in terms of the specific composition in summer and autumn. Some quantitative indicators of cyanobacteria, such as their abundance and biomass, were minimal and maximal in spring and summer–autumn, respectively. Toxic and potentially toxic species belonging to the genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Microcystis*, *Nodularia*, and *Nostoc* were present among the detected cyanobacteria in each of the studied seasons of the year. The total contribution of representatives of these genera to the total abundance of phytoplankton varied from 4.0% in spring to 65.0% in autumn. In summer, the share of cyanobacteria from the above genera in the total number of microalgae accounted for ~40.0%. The greatest role was noted for the algae *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, which causes “blooming” of reservoirs and also produces the toxin microcystin with hepatotoxicity. Any study of Lake Pskov requires constant monitoring of the content of cyanotoxins, especially in autumn, when the maximum biomass content of cyanobacteria, including toxic species, is observed, which may lead to serious consequences.

Keywords: aquatic ecosystems, phytoplankton, environmental monitoring, cyanobacterial communities, toxins, water bloom, eutrophication

Funding. The reported study was funded by Russian Science Foundation (project number 20-64-46018).

For citation: Drozdenko T. V., Aleksandrova S. M., Antal T. K., Tikhomirova E. I. Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 4, pp. 388–399 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-388-399>

REFERENCES

Belyakova R. N. Bloom forming *Aphanocapsa* and *Microcystis* species (Cyanoprokaryota) in water bodies of North-West of Russia. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 2004, vol. 37, pp. 8–21 (in Russian).

✉ Corresponding author. Laboratory of Integrated Environmental Research, Pskov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Tatiana V. Drozdenko: <https://orcid.org/0000-0002-5553-2296>, tboichuk@mail.ru; Svetlana M. Aleksandrova: <https://orcid.org/0000-0002-8524-3997>, super-kandidat@rambler.ru; Taras K. Antal: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8034>, taras_an@mail.ru; Elena I. Tikhomirova: <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>, tichomirova_ei@mail.ru.

Belyakova R. N., Voloshko L. N., Gavrilova O. V., Gogorev R. M., Makarova I. V., Okolodkov Yu. B., Rundina L. A. *Bloom Forming Algae in Water Bodies of North-West of Russia*. Moscow, KMK Scientific Press, 2006. 368 p. (in Russian).

Belykh O. I., Gladkikh A. S., Sorokovikova E. G., Tikhonova I. V., Potapov S. A., Fedorova G. A. Microcystin-producing cyanobacteria in water bodies of Russia, Belarus and Ukraine. *Chemistry for Sustainable Development*, 2013, vol. 21, no. 4, pp. 363–378 (in Russian).

Voloshko L. N., Plyushch A. V., Titova N. N. Toxins of Cyanobacteria (Cyanophyta). *Algologia*, 2008, vol. 18, no. 1, pp. 3–21 (in Russian).

Voyakina E. Yu., Russkikh Ya. V., Chernova E. N., Zhakovskaya Z. A. Toxic cyanobacteria and their metabolites in water bodies of the North-West of Russia. *Theoretical and Applied Ecology*, 2020, no. 1, pp. 124–129 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-124-129>

Gromov B. V. Cyanobacteria in the biosphere. *Soros Educational Journal*, 1996, no. 9, pp. 33–39 (in Russian).

Drozdenco T. V., Antal T. K. Evaluating water quality in Velikaya River by using phytoplankton characteristics. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, 2021, no. 1, pp. 51–60 (in Russian). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-1-51-60>

Kuzmin G. V. *Tablitsy dlia vychisleniia biomassy vodoroslei* [Tables for Calculating the Biomass of Algae]. Magadan, Dal'nevostochnyi nauchnyi tsentr AN SSSR Publ., 1984. 47 p. (in Russian).

Pskov-Peipsi Lake. In: *Ryby i ozera Pskovskoi oblasti* [Fish and Lakes of the Pskov Region]. Pskov, 2022. Available at: http://pskovfish.ru/ozero-sp/ozera_pskovsko_chydscoe.htm (accessed 25 June 2020).

Sadchikov A. P. *Metody izucheniia presnovodnogo fitoplanktona: metodicheskoe rukovodstvo* [Methods for Studying Freshwater Phytoplankton: A Methodological Guide]. Moscow, Universitet i shkola Publ., 2003. 157 p. (in Russian).

Stepanova N. Yu., Khaliullina L. Yu., Nikitin O. V., Latypova V. Z. Structure and toxicity of cyanobacteria in recreational areas of reservoirs in the Kazan region. *Water: Chemistry and Ecology*, 2012, no. 11, pp. 67–72 (in Russian).

Chernova E. N., Russkikh Ya. V., Zhakovskaya Z. A. Toxic metabolites of blue-green algae and methods for their determination. *Bulletin of St. Petersburg State University. Physics and Chemistry*, 2017, vol. 4, iss. 4, pp. 440–473 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.408>

Shmidt V. M. *Statisticheskie metody v sravnitel'noi floristike* [Statistical Methods in Comparative Floristry]. Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1980. 176 p. (in Russian).

Paerl H. W., Huisman J. Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, vol. 1, iss. 1, pp. 27–37. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>

Rastogi R. P., Sinha R. P., Incharoensakdi A. The cyanotoxin-microcystins: Current overview. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2014, vol. 13, iss. 2, pp. 215–249. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9334-6>

Rastogi R. P., Madamwar D., Incharoensakdi A. Bloom dynamics of Cyanobacteria and their toxins: Environmental health impacts and mitigation strategies. *Frontiers in Microbiology*, 2015, vol. 6, article number 1254. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01254>

Sivonen K. Cyanobacterial toxins and toxin production. *Phycologia*, 1996, vol. 35, suppl. 6, pp. 12–24. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-35-6S-12.1>

Tanabe Y., Hodoki Y., Sano T., Tada K., Watanabe M. M. Adaptation of the freshwater bloom-forming cyanobacterium microcystis aeruginosa to Brackish water is driven by recent horizontal transfer of sucrose genes. *Frontiers in Microbiology*, 2018, vol. 9, article number 1150. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01150>

Guidelines for Safe Recreational Water Environments. Vol. 1: Coastal and Fresh Waters. Geneva, World Health Organization, 2003. 219 p.