Труды Карельского научного центра РАН
№ 5. 2021. С. 20–31
DOI: 10.17076/eco1391

УДК 574.583

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РАЗВИТИЕМ ФИТОПЛАНКТОНА И КИСЛОРОДНЫМ РЕЖИМОМ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ

К. И. Абрамова, Р. П. Токинова, Н. Р. Водунон, Р. Р. Шагидуллин, Н. В. Шурмина

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

В фитопланктоне устьевой области реки Казанки (левый приток Куйбышевского водохранилища) в летний период 2017–2020 гг. по индексу плотности преобладали Cyanophyta (июль–август) и Bacillariophyta (июнь). Среди синезеленых водорослей развивались преимущественно нитчатые формы – *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault и *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek; среди диатомовых – центричные формы диатомей (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Stephanodiscus* sp., *Cyclotella* sp.). Содержание растворенного кислорода в поверхностном слое воды не опускалось ниже нормативных значений ($ПДК_{рх}$) и варьировало в пределах 6,2–17,0 мгO_2/л. Превышение $ПДК_{рх}$ легкоокисляемого органического вещества по показателю $БПК_5$ составило 1,4–3,7 раза. Корреляционный анализ позволил выявить умеренную и/или сильную тесноту связи таксономического состава и обилия фитопланктонного сообщества с показателями кислородного режима в поверхностном слое реки. Обогащение воды кислородом связано преимущественно с развитием зеленых (коэффициент Спирмена 0,69, $p < 0,05$) и диатомовых (0,56) водорослей; образование органического вещества в воде – с развитием синезеленых (0,69), динофитовых (0,69) и диатомовых (0,74). Метеорологические (температура воздуха, количество выпавших осадков) и временные (год, месяц наблюдений) факторы влияют на индекс плотности фитопланктона, содержание растворенного кислорода, ХПК и $БПК_5$ в устьевой области р. Казанки (по тесту Краскела – Уоллиса, $p < 0,05$).

Ключевые слова: фитопланктон; индекс плотности; растворенный кислород; органическое вещество; устьевая область; река Казанка.

K. I. Abramova, R. P. Tokinova, N. R. Vodounon, R. R. Shagidullin, N. V. Shurmina. ANALYSIS OF CORRELATION BETWEEN PHYTOPLANKTON AND OXYGEN REGIME IN RIVER MOUTH AREA

In the summer seasons of 2017–2020, Cyanophyta (July – August) and Bacillariophyta (June) prevailed in phytoplankton in the mouth of the Kazanka River (left-hand tributary to Kuibyshevskoe storage reservoir). Cyanobacteria were mostly represented by filamentous forms – *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault and *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek; diatoms were predominantly centric (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Stephanodiscus* sp., *Cyclotella* sp.). The dissolved oxygen content in the surface water layer did not fall below standard values for fishery wa-

ters (MPC_f) and varied within 6.2–17.0 mgO_2/l. Easily oxidizable organic matter expressed as BOD_5 exceeded MPC_f 1.4–3.7-fold. Correlation analysis revealed a moderate and/or strong relationship between the taxonomic composition and abundance of the phytoplankton community on the one hand and oxygen regime parameters in the river's surface water layer on the other. Water enrichment with oxygen is mainly associated with the development of green algae (Spearman's coefficient at 0.69, $p < 0.05$) and diatoms (0.56); organic matter formation in the water – with the development of cyanobacteria (0.69), dinophytes (0.69), and diatoms (0.74). Meteorological (air temperature, precipitation) and temporal (year, month of observations) factors influence the phytoplankton density index, dissolved oxygen content, COD and BOD_5 in the mouth of the Kazanka River (according to the Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$).

K e y w o r d s: phytoplankton; density index; dissolved oxygen; organic matter; river mouth; Kazanka River.

Введение

Повсеместное загрязнение водоемов и водотоков увеличивает интерес к изучению возможностей естественного восстановления качества вод и процессов, важных для самоочищения [Остроумов, 2003; Akbaeva et al., 2019], в частности, оксигенного фотосинтеза, сопровождающегося выделением кислорода в воду хлорофиллоносными растениями, фитопланктоном [Книпович, 1932; Falkowski, 1994; Rocha et al., 2009]. Одним из основных показателей качества воды является содержание растворенного кислорода, участвующего в окислении органических соединений. Кислородный режим водоемов зависит от многих факторов, в частности, от интенсивности продукционно-деструкционных процессов в водной массе, обменных процессов на границе воды и атмосферы [Даценко, Пуклаков, 2020]. В большинстве водоемов с низкой проточностью существенную роль в обогащении воды кислородом играет фотосинтетическая деятельность водных растений, в частности, фитопланктона [Девяткин, Метелева, 2012].

Для водоемов рыбохозяйственного значения предельно допустимая концентрация ($ПДК_{рх}$) растворенного кислорода составляет 6,0 мгO_2/л. Снижение его концентрации до критических значений усиливает процесс эвтрофикации водоема [Hupfer, Lewandowski, 2008; Dekun et al., 2013; Шатрова и др., 2016], вызывает гибель рыб и других гидробионтов [Golam, 2014; Gilmore et al., 2019].

Устьевая область реки Казанки, находящаяся в зоне подпора водами Куйбышевского водохранилища [Мозжерин и др., 2012; Гидроэкология..., 2015], располагается в черте г. Казани (Республика Татарстан). Являясь слабопроточным водным объектом, принимающим значительные объемы ливневых сточных вод с городской территории, устьевая область подвержена эвтрофикации, «цветению» воды водорослями и, как следствие, активному потреблению растворенного кислорода на окисление легкоокисляемых форм органического вещества (в том числе выделяемого фитопланктоном) в воде. В летний период здесь отмечаются значительные показатели биохимического и химического потребления кислорода, активное его вовлечение в окисление органических соединений, приводящее к возникновению локального дефицита O_2 в воде [Валиев и др., 2018]. В этот же период наблюдается массовое развитие Cyanophyta (по численности и биомассе) с доминированием *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault и *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek. Немаловажная роль в формировании структурных характеристик фитопланктона принадлежит Bacillariophyta, Chlorophyta, Cryptophyta и Miozoa (класс Dinophyceae) [Абрамова и др., 2020].

В связи с вышеизложенным, а также с отсутствием исследований по взаимосвязи фитопланктона с показателями кислородного режима в устьевой области р. Казанки целью данной работы является проведение корреляционного анализа между содержанием в воде растворенного кислорода и количественным обилием фитопланктона.

Материалы и методы

Исследования проведены в ходе комплексной экспедиции Института проблем экологии и недропользования АН РТ (г. Казань) в устьевой области р. Казанки. Гидробиологические (фитопланктон) и гидрохимические (содержание растворенного кислорода (O_2, мгO_2/л), химическое потребление кислорода (ХПК, мгO_2/л), биохимическое потребление кислорода ($БПК_5$, мгO_2/л)) пробы отобраны на 14 станциях, расположенных на 6-километровом участке реки (от N55°51′03.16″, E49°09′36.97″

до N55°48′26.39″, E49°08′38.73″). Отбор производился ежемесячно с июня по август 2017–2020 гг. из поверхностного слоя воды в первой половине дня (10.00–13.00). Всего за период исследований отобрано 84 количественные и качественные пробы. Сбор и обработка проб фитопланктона выполнены по общепринятым методикам [Методика..., 1975]. Пробы, зафиксированные раствором Люголя, концентрированы фильтрацией через мембранные фильтры марки «Владипор» № 9 (с диаметром пор около 0,5 мкм) с применением вакуумного насоса. Подсчет и измерение водорослей проведены в камере Горяева (объем 0,9 мкл) в трех повторностях; биомасса определена счетно-объемным методом. Для идентификации видовой принадлежности водорослей использованы отечественные руководства: «Определитель пресноводных водорослей СССР» в 13 томах (1951–1986 гг.), «Определитель диатомовых водорослей России» [Куликовский и др., 2016]; из зарубежных руководств использовали определители серий «Süßwasserflora von Mitteleuropa» (1983–2005 гг.). При составлении списка видов учтены современные номенклатурные преобразования, представленные на сайте Algaebase [Guiry, Guiry, 2020]. При обработке отдельных таксономических групп водорослей руководствовались источниками: по синезеленым – [Komarek, Anagnostidis, 1998, 2005], диатомовым – [Lange-Bertalot, 2013; Куликовский и др., 2016], зеленым – [Ruggiero et al., 2015], золотистым – [Preisig, 1995] и динофитовым – [Popovsky, Pfiester, 1990; Крахмальный, 2011].

В гидробиологии при изучении сообществ все чаще применяют комбинированные показатели, включающие несколько количественных параметров (численность (*N*), биомасса (*B*), встречаемость (*P*) и т. д.). Особенно широкое применение нашли различные модификации индекса плотности Бродской – Зенкевича [Количественные..., 2005]. Учитывая, что в мелководных зонах (какой является исследуемый устьевой участок р. Казанки) показатель состояния популяции зависит и от биомассы, и от численности [Денисов, 1972], для оценки количественных характеристик фитопланктона нами использован индекс плотности (Ip), вычисляемый по формуле $\sqrt{B \times N}$, где *B* – биомасса вида, *N* – численность вида [Шитиков и др., 2003]. К доминирующим видам/отделам отнесены таксоны с индексом плотности > 10 % от суммарного индекса плотности общего фитопланктона; к субдоминирующим – с Ip, равным 5–10 %.

Анализ по определению содержания растворенного кислорода, ХПК и $БПК_5$ в воде выполнен в лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды ИПЭН АН РТ.

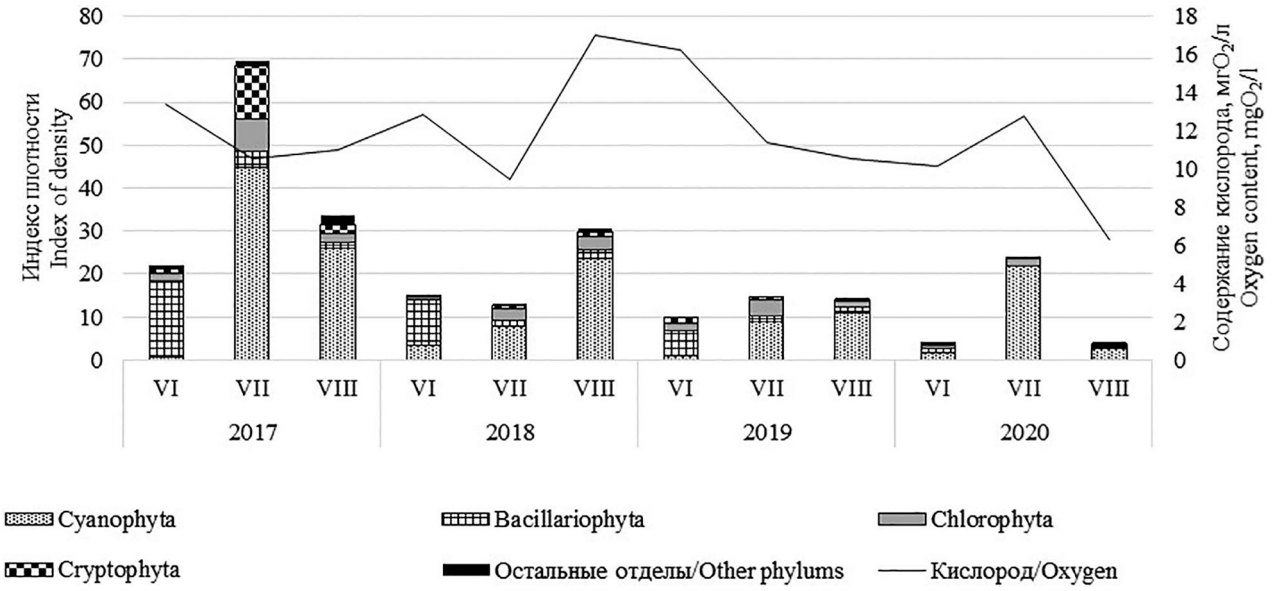
Статистическое сравнение гидробиологических, гидрохимических показателей с климатическими, временными факторами проведено с использованием теста Краскела – Уоллиса – непараметрического статистического критерия, оценивающего различия между группами переменных с ненормальным распределением. В данной работе представлены коэффициенты корреляции гидрохимических показателей воды (O_2, ХПК, $БПК_5$) с индексами плотности фитопланктона и его отделов. Для анализа взаимосвязи применили непараметрический метод – корреляционный коэффициент Спирмена, позволяющий определить тесноту (силу) и направление корреляционной связи между двумя признаками. Оценку тесноты связи проводили по Чеддоку (до 0,29 – практически отсутствует; 0,30–0,49 – слабая; 0,50–0,69 – умеренная; 0,70–1,0 – сильная). Статистический анализ данных проведен с помощью программы Statistica 10 [Халафян, 2008].

Метеорологические показатели получены из открытых ГИС-порталов в сети Интернет по адресу: http://www.pogodaiclimat.ru. Использовали данные по количеству выпавших осадков и температуре воздуха за 7 дней до отбора проб, руководствуясь тем, что степень воздействия климатических факторов на фитопланктон регулируется, в частности, временным фактором (выбор времени произвольный).

Результаты и обсуждение

В летний период среднемесячная температура воздуха в г. Казани варьировала в пределах +15,6...+22,3 °С, общее количество выпавших осадков – 26–104 мм. В 2017 г. количество выпавших осадков составило 48–95 мм (79–142 % от нормы), в 2018 г. – 26–59 мм (44–87 %), в 2019 г. – 41–104 мм (66–172 %), в 2020 г. – 69–97 мм (103–162 %); среднемесячная температура в 2017 г. – +15,6...+19,7 °С (отклонение от нормы составило –2,5...+2,0 °С), в 2018 г. – +16,9...+22,3 °С (–1,2...+2,2 °С), в 2019 г. – +16,0...+19,0 °С (–1,7...+0,9 °С), в 2020 г. – +16,8...+22,2 °С (–1,3...+2,0 °С). По данным, суммированным за семь дней до отбора проб, 2017–2020 гг. были схожи по температуре воздуха, 2018–2020 гг. – по количеству выпавших осадков; летний период 2017 г. достоверно отличался ($p < 0,05$) по количеству выпавших осадков от аналогичного периода трех других лет.

В летнем фитопланктоне устьевой области реки Казанки встречен 171 вид и внутривидовой



Вклад отдельных групп фитопланктона в индекс плотности и содержание растворенного кислорода в устьевой области р. Казанки

Contribution of individual phytoplankton groups to the density index and dissolved oxygen content in the mouth area of the Kazanka River

таксон из семи систематических отделов: Cyanophyta (Cyanoprokaryota) – 32, Bacillariophyta – 40, Ochrophyta (класс Chrysophyceae) – 16, Cryptophyta – 5, Miozoa (класс Dinophyceae) – 3, Euglenozoa (Euglenophyta) – 7 и Chlorophyta – 68 видов. Наиболее разнообразен в таксономическом отношении отдел Chlorophyta с преобладанием видов порядка Sphaeropleales. Весной и в начале лета фитопланктон устьевого участка р. Казанки представлен в основном диатомовыми и золотистыми водорослями. В конце июня диатомовые сменяются фитопланктоном теплолюбивого летнего комплекса, в котором ведущая роль принадлежит синезеленым, достигающим высоких значений численности (до 170,9 ± 15,3 млн кл./л на некоторых станциях). В целом по индексу плотности в июне преобладают Bacillariophyta, в июле–августе – Cyanophyta (рис.).

Среди цианопрокариот преимущественно развивались нитчатые формы – *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault (порядок Nostocales) и *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek (порядок Oscillatoriales) (табл. 1). Эти виды широко распространены в континентальных водоемах и нередко регистрируются в качестве массовых во многих водоемах умеренной зоны [Горохова, 2012]. Встречались также *Limnothrix planctonica* (Woloszynska) Meffert [*Oscillatoria planctonica* Woloszynska]; *Dolichospermum flos-aquae* (Brébisson ex Bornet & Flahault) Wacklin et al. [*Anabaena flos-aquae* Brébisson ex Bornet & Flahault]; *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek и *Merismopedia minima* G. Beck. Среди диатомовых водорослей в июне преимущественно развивались центричные формы диатомей (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Stephanodiscus* sp., *Cyclotella* sp.).

Из зеленых водорослей преобладали широко распространенные виды р. *Monoraphidium* (*M. minutum* (Nägeli) Komárková-Legnerová, *M. contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *M. griffithii* (Berkeley) Komárková-Legnerová); *Desmodesmus communis* Hegewald [*Scenedesmus quadricauda* Chodat]; *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat; *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Wynne [*Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing]; р. *Coelastrum* (*C. microporum* Nägeli, *C. astroidum* De-Notaris), в обилии развивающиеся в летнем фитопланктоне водоемов с замедленным водообменом. Встречались жгутиковые формы – представители р. *Chlamydomonas*, *Pandorina morum* (Müller) Bory.

Золотистые водоросли были представлены преимущественно *Dinobryon divergens* Imhof и видами р. *Chromulina (Chr. parvula* Conrad, *Chr. tenera* Skuja, *Chr. rosanoffii* (Woronin) Blochmann*)*; эвгленовые – видами р. *Euglena* и р. *Trachelomonas*.

Характерные для стратифицированных водоемов водоросли вносили значимую роль в суммарную биомассу фитопланктона: криптофитовые – виды р. *Cryptomonas* (*Cr. erosa* Ehrenberg, *Cr. ovata* Ehrenberg) и *Chroomonas acuta* Utermöhl; динофитовые – *Ceratium hirundinella* (Müller) Dujardin и *Peridinium* sp.

Таблица 1. Доминирующие и субдоминирующие по индексу плотности виды в фитопланктоне устьевой области р. Казанки

Table 1. Dominant and subdominant species in the density index in the phytoplankton of the mouth region of the Kazanka River

Год/Месяц Year/Month	VI	VII	VIII
2017	**Центричные формы диатомей** **Centric forms of diatoms** Виды р. *Nitzschia* Species g. *Nitzschia*	***Aphanizomenon flos-aquae*** *Planktothrix agardhii* *Chroomonas acuta* Виды р. *Cryptomonas* Species g. *Cryptomonas* *Chlamydomonas* sp.	***Aphanizomenon flos-aquae*** ***Planktothrix agardhii***
2018	***Planktothrix agardhii*** **Центричные формы диатомей** **Centric forms of diatoms**	***Planktothrix agardhii***	***Planktothrix agardhii*** Центричные формы диатомей Centric forms of diatoms
2019	***Chroomonas acuta*** **Центричные формы диатомей** **Centric forms of diatoms** *Limnothrix planctonica*	***Aphanizomenon flos-aquae*** Центричные формы диатомей Centric forms of diatoms *Desmodesmus communis* *Coelastrum microporum* *Chlamydomonas* sp.	***Planktothrix agardhii*** *Aphanizomenon flos-aquae*
2020	***Aphanizomenon flos-aquae*** ***Planktothrix agardhii*** **Центричные формы диатомей** **Centric forms of diatoms** *Dinobryon divergens*	***Aphanizomenon flos-aquae*** *Planktothrix agardhii*	***Aphanizomenon flos-aquae*** ***Planktothrix agardhii*** Виды р. *Cryptomonas* Species g. *Cryptomonas*

Примечание. Полужирным шрифтом выделены доминирующие виды.

Note. The dominant species are shown in bold.

Таблица 2. Средние значения гидрохимических показателей и индекса плотности фитопланктона в устьевой области р. Казанки в летний период

Table 2. Average values of hydrochemical parameters and phytoplankton density index in the mouth area of the Kazanka River in summer

Параметры/Год Parameters/Year	2017	2018	2019	2020
O_2, мгO_2/л O_2, mgO_2/l	11,63 ± 0,90	13,07 ± 2,20	12,90 ± 1,97	9,67 ± 1,89
ХПК, мгO_2/л COD, mgO_2/l	26,47 ± 4,91	17,47 ± 2,26	19,50 ± 2,71	14,43 ± 2,64
БПК$_5$, мгO_2/л BOD$_5$, mgO_2/l	6,37 ± 0,30	5,33 ± 1,17	3,37 ± 0,26	3,43 ± 0,92
Ip фитопланктон в целом Ip phytoplankton general	38,50 ± 13,16	18,83 ± 5,38	12,10 ± 1,54	11,60 ± 7,81
Ip Cyanophyta	23,70 ± 12,76	11,59 ± 6,07	6,80 ± 3,03	8,79 ± 6,17
Ip Bacillariophyta	7,72 ± 5,15	4,77 ± 2,92	2,92 ± 1,56	0,39 ± 0,20
Ip Chlorophyta	3,77 ± 1,87	2,07 ± 0,74	2,27 ± 0,77	0,93 ± 0,35
Ip Ochrophyta	0,70 ± 0,09	0,19 ± 0,12	0,12 ± 0,03	0,22 ± 0,11
Ip Cryptophyta	5,15 ± 3,62	0,63 ± 0,29	0,80 ± 0,27	0,36 ± 0,05
Ip Miozoa	0,60 ± 0,36	0,13 ± 0,09	0,06 ± 0,03	0,09 ± 0,04
Ip Euglenozoa	0,12 ± 0,08	0,09 ± 0,02	0,10 ± 0,02	0,04 ± 0,01

Примечание. Здесь и в табл. 3: O_2 – кислород, ХПК – химическое потребление кислорода, БПК$_5$ – биохимическое потребление кислорода, Ip – индекс плотности.

Note. Here and in Table 3: O_2 – oxygen, COD – chemical oxygen demand, BOD$_5$ – biochemical oxygen demand, Ip – index of density.

Содержание растворенного кислорода в поверхностном слое устьевой области реки за весь период наблюдений не опускалось ниже нормативных значений (ПДК$_{рх}$ 6,0 мгO_2/л) и варьировало в пределах 6,2–17,0 мгO_2/л. Отношение БПК$_5$/ХПК, характеризующее долю доступных биохимическому окислению органических соединений [Рижинашвили, 2008], составило 13–36 %. Превышение ПДК легкоокисляемого органического вещества по показателю БПК$_5$ (ПДК$_{рх}$ 2 мгO_2/л) составило 1,4–3,7 (табл. 2).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена гидрохимических показателей с индексами плотности фитопланктона ($p < 0,05$)

Table 3. Spearman correlation coefficients of hydrochemical parameters with phytoplankton density indices ($p < 0.05$)

Ip	2017			2018			2019			2020		
	O_2	ХПК COD	БПК$_5$ BOD$_5$	O_2	ХПК COD	БПК$_5$ BOD$_5$	O_2	ХПК COD	БПК$_5$ BOD$_5$	O_2	ХПК COD	БПК$_5$ BOD$_5$
Фитопланктон в целом Phytoplankton in general	-	-	-	**0,68**	-	-	-	-	-	**0,64**	**0,57**	-
Cyanophyta	-	**0,78**	-	-	-	–0,43	**–0,76**	-	-	0,41	**0,60**	-
Bacillariophyta	**0,65**	-	-	-	-	**0,74**	0,47	-	-	-	-	-
Chlorophyta	-	-	-	-	**–0,57**	**–0,58**	-	-	-	**0,69**	-	**0,50**
Cryptophyta	-	-	-	-	-	-	0,45	-	-	-	-	-
Miozoa	-	**0,69**	-	–0,43	-	-	-	-	**0,53**	-	-	-
Ochrophyta	-	-	-	-	**–0,60**	–0,41	-	-	-	-	–0,46	-
Euglenozoa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. Полужирным шрифтом выделены умеренная и сильная теснота связи.

Note. Moderate and severe tightness of the connection are shown in bold.

Одним из процессов, обогащающих воду растворенным кислородом, является его выделение водной растительностью, в частности фитопланктоном, в процессе фотосинтеза. В табл. 3 представлены коэффициенты корреляции между индексами плотности фитопланктона и гидрохимическими показателями.

Для 2017 г. установлены корреляции содержания O_2 с диатомовыми (коэффициент Спирмена – 0,65), ХПК – с синезелеными (0,78) и динофитовыми (0,69) водорослями.

Для 2018 г. установлены корреляции содержания O_2 с общим фитопланктоном (0,68), ХПК – с золотистыми (–0,60) и зелеными (–0,57), БПК$_5$ – с диатомовыми (0,74) и зелеными (–0,58) водорослями.

В 2019 г. O_2 коррелировал с синезелеными (–0,76), в 2020 г. – с общим фитопланктоном (0,64) и зелеными (0,69) водорослями.

Отмечена тенденция положительной связи между содержанием растворенного кислорода и индексом плотности диатомовых, зеленых водорослей; ХПК и Ip синезеленых и динофитовых; БПК$_5$ и Ip диатомовых, динофитовых водорослей.

Отрицательная корреляция отмечена между O_2 и индексом плотности синезеленых; ХПК и Ip золотистых, зеленых водорослей.

Общий индекс плотности фитопланктона положительно коррелировал с содержанием растворенного кислорода (0,64–0,68) и ХПК (0,57) (табл. 3).

По результатам корреляции Спирмена ($p < 0,05$) исследуемых параметров за четыре года установлено, что содержание растворенного кислорода в устьевом участке реки коррелировало с индексом плотности зеленых (0,38), диатомовых (0,47) и криптофитовых (0,25) водорослей; ХПК – с содержанием синезеленых (0,22) и золотистых (–0,28); БПК$_5$ – диатомовых (0,46) водорослей. У эвгленовых и динофитовых водорослей связи с показателями кислородного режима воды не выявлены. В целом индекс плотности фитопланктонного сообщества коррелировал с O_2 (0,50), ХПК (0,42) и БПК$_5$ (0,44).

Анализ позволил выявить умеренную и/или сильную тесноту связи между некоторыми показателями, межгодовую изменчивость в значениях коэффициентов корреляции. Степень тесноты связи индекса плотности фитопланктона с гидрохимическими показателями, предположительно, регулируется интенсивностью развития, количественными характеристиками фитопланктонного сообщества в целом и отдельных его групп, что, в свою очередь, определяется целым рядом факторов, в частности, гидрометеорологическими (количеством выпавших осадков, температурой воздуха). Межгодовая изменчивость в значениях коэффициентов корреляции (наличие и/или отсутствие), вероятно, определяется сложной опосредованностью влияния внешних факторов на водоросли, их межгодовой вариабельностью.

По результатам теста Краскела – Уоллиса ($p < 0,05$) метеорологические (температура воздуха и количество выпавших осадков) и временные (год и месяц наблюдений) факторы влияют на гидробиологические (индекс плотности фитопланктона) и гидрохимические (со-

держание растворенного O_2, ХПК и БПК) показатели. Наименьшее влияние (по значению *H*) на исследуемые параметры оказывает месяц (*H* варьировало в пределах 7,8–71,6). Вероятно, это связано с тем, что в статистическом анализе использовали месяцы только летнего сезона. На индекс плотности фитопланктонного сообщества влияют количество выпавших осадков (со значением *H*, равным 44,7), температура воздуха (39,4) и год (33,6); на содержание O_2 – те же факторы с величинами 371,3, 370,6 и 81,9; на ХПК – 303,2, 230,6 и 109,3; на $БПК_5$ – 338,9, 323,8 и 168,7 соответственно.

По данным Г. И. Прониной [2016], на динамику содержания растворенного кислорода в водоемах влияет видовой состав альгофлоры. Согласно рассчитанным коэффициентам корреляции, обогащение воды устьевой области реки кислородом связано преимущественно с развитием диатомовых (с преобладанием центричных форм диатомей и видов р. *Nitzschia*), зеленых (представителей пор. Sphaeropleales и *Chlamydomonas* sp.) и криптофитовых (видов р. *Cryptomonas*) водорослей; увеличение органического вещества – с развитием динофитовых (*C. hirundinella* и *Peridinium* sp.), синезеленых (*Aph. flos-aquae* и *P. agardhii*) и диатомовых.

Согласно литературным источникам, зеленые и синезеленые водоросли [Peschek, 1999], большинство видов диатомовых водорослей [Lavaud, 2007; Prihoda et al., 2012], золотистые, криптофитовые и динофитовые [West, 1982] являются фотосинтезирующими организмами и имеют важное значение в формировании первичной продуктивности гидроэкосистем. Также они являются источником появления легкоокисляемых органических веществ в воде [Smith, Piedrahita, 1988; Даценко, Пуклаков, 2020]. Соответственно, баланс растворенного кислорода учитывает, в частности, продукционно-деструкционные процессы, связанные с развитием фитопланктона (фотосинтез, дыхание, разложение органического вещества). В период интенсивной вегетации фитопланктона теоретически можно ожидать активизацию в водотоке процессов как продукции (увеличение содержания O_2), так и деструкции (увеличение потребления O_2 на окисление легкоокисляемого органического вещества). Какой из указанных процессов будет превалировать в гидроэкосистеме, зависит от многих факторов: метеорологических [Матвеев и др., 2020], антропогенных [Локтионова, Яковлева, 2011], физико-химических [Пронина и др., 2016], биологических [Салманов, 1999; Boyd, 2017] и др. Роль и удельный вес каждого из перечисленных факторов являются индивидуальными для каждого отдельного водотока.

Являясь фотосинтезирующими организмами [Peschek, 1999], синезеленые водоросли активно развиваются в летнем фитопланктоне реки (средняя численность за летний период 2017–2020 гг. 62,7 ± 16,0 млн кл./л), однако положительной корреляции (умеренной и/или сильной) их содержания с содержанием в воде кислорода не выявлено. Возможно, это обусловлено чрезмерным развитием Cyanophyta (Ip составил 6,80 ± 3,03 – 23,70 ± 12,76) и значительным увеличением органического вещества (коэффициент Спирмена 0,78, $p < 0,05$), приводящими к снижению содержания растворенного кислорода (–0,76) в условиях слабопроточного участка.

Результаты наших исследований подтверждаются данными Е. С. Кривиной [2018] – в малых водоемах урбанизированных территорий не выявлено корреляционной связи между количественным развитием фитопланктона и содержанием растворенного кислорода, что связано с преобладанием в сообществе Cyanophyta; а также данными С. В. Тучина и Т. А. Бренника [2020] – в водах Шершневского водохранилища в период активного развития синезеленых водорослей отмечалось снижение содержания растворенного кислорода.

Можно также отметить, что в Азовском море высокое содержание кислорода совпадает с интенсивным развитием синезеленых водорослей, а относительно низкое – с развитием диатомовых [Нестерова и др., 1988]; в озере Байкал динофитовые положительно коррелируют с O_2 [Afonina et al., 2020]. Анализ литературных данных свидетельствует о наличии корреляционной связи фитопланктона с содержанием растворенного кислорода в воде. Однако какая группа водорослей будет благоприятно влиять на насыщение воды кислородом, в определенной степени зависит от физико-географических и гидрологических особенностей водного объекта, особенностей таксономического разнообразия и количественного развития фитопланктона.

Таким образом, в фитопланктоне устьевой области р. Казанки основными отделами, положительно коррелирующими с растворенным кислородом в воде, являются Bacillariophyta (0,56) с преобладанием по индексу плотности центричных форм диатомей и видов р. *Nitzschia*, Chlorophyta (0,69) – с преобладанием видов порядка Sphaeropleales и *Chlamydomonas* sp. Отделами, положительно коррелирующими с формированием органического вещества, являются Cyanophyta (0,69) с преобладани-

ем *Aph. flos-aquae* и *P. agardhii*, Miozoa (0,69) с преобладанием *C. hirundinella* и *Peridinium* sp., Bacillariophyta (0,74).

Степень тесноты связи фитопланктона с кислородным режимом устьевой области реки, межгодовая изменчивость в значениях коэффициентов (наличие и/или отсутствие по годам) определяется сложной опосредованностью влияния внешних факторов (в частности, метеорологических) на водоросли, их межгодовой вариабельностью, а также интенсивностью развития, количественными характеристиками фитопланктонного сообщества в целом и отдельных его групп.

Результаты проведенного корреляционного анализа и литературные данные [Кравчук, 2004; Арбузова, Левенец, 2010; Александров, 2011] подтверждают, что активный рост синезеленых водорослей в водотоках умеренной зоны может приводить к превышению $ПДК_{рх}$ органических веществ, уменьшению содержания растворенного кислорода, формированию дефицита O_2 в воде и, как следствие, к заморам гидробионтов и замедлению процессов самоочищения. «Цветение» воды является проблемой экосистемного уровня, в основе которой лежит комплекс причин, характерных для данного водотока, и ее решение требует системного подхода.

Заключение

В летнем фитопланктоне устьевой области реки Казанки в 2017–2020 гг. по индексу плотности преобладали синезеленые (в июле–августе) и диатомовые (в июне) водоросли. Среди первых развивались преимущественно нитчатые формы – *Aph. flos-aquae* и *P. agardhii*, среди диатомовых – центричные формы диатомей (*S. huntzshii*, *Stephanodiscus* sp., *Cyclotella* sp.).

Корреляционный анализ позволил выявить умеренную и/или сильную тесноту связи таксономического состава и обилия фитопланктонного сообщества с показателями кислородного режима в поверхностном слое реки. В определенные годы наблюдения содержание растворенного кислорода положительно коррелирует ($p < 0,05$) с индексом плотности зеленых (0,69) и диатомовых (0,56) водорослей, ХПК – с Ip синезеленых (0,69) и динофитовых (0,69), $БПК_5$ – с Ip диатомовых (0,74) и динофитовых (0,53). Отрицательная корреляция содержания O_2 отмечена с Ip синезеленых водорослей (–0,76); ХПК – с Ip золотистых (–0,60) и зеленых (–0,57). Общий индекс плотности фитопланктона положительно коррелирует с содержанием растворенного кислорода (0,66). Межгодовая изменчивость в значениях коэффициентов корреляции определяется сложной опосредованностью влияния внешних факторов на фитопланктон, их межгодовой вариабельностью, интенсивностью развития, количественными характеристиками фитопланктонного сообщества и его отделов, видового разнообразия альгофлоры.

За четыре года исследования индекс плотности фитопланктонного сообщества коррелирует ($p < 0,05$) с показателями кислородного режима устьевого участка р. Казанки, в частности, с содержанием растворенного кислорода – индекс плотности зеленых, диатомовых и криптофитовых водорослей; с ХПК – синезеленых и золотистых; с $БПК_5$ – диатомовых.

По результатам теста Краскела – Уоллиса ($p < 0,05$), метеорологические (температура воздуха, количество выпавших осадков) и временные (год, месяц наблюдений) факторы влияют на индекс плотности фитопланктона, содержание растворенного кислорода, ХПК и $БПК_5$ в устьевом участке р. Казанки.

Авторы выражают благодарность Д. В. Иванову за помощь в проведении химико-аналитических измерений.

Литература

Абрамова К. И., Токинова Р. П. Межгодовая динамика летнего фитопланктона в устьевой области реки Казанки (г. Казань) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2020. № 3. С. 89–94.

Александров С. В. Современное экологическое состояние и загрязнение Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Вода: химия и экология. 2011. № 11. С. 3–9.

Арбузова Л. Л., Левенец И. Р. Водоросли. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2010. 177 с.

Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р., Шамаев Д. Е., Мустафина Л. К., Шурмина Н. В., Абдуллина Ф. М., Богданова О. А., Зиганшин И. И. Оценка вклада загрязняющих веществ в формирование класса загрязненности поверхностных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 3. С. 57–64.

Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища / Ред. А. В. Крылов. Ярославль: Филигрань, 2015. 466 с.

Горохова О. Г. Фитопланктон озерной системы Кабан в 2011 году // Георесурсы. 2012. № 7(49). С. 24–28.

Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Прогноз развития фитопланктона в проектируемом низконапорном водохранилище на р. Дон // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 1. С. 57–67.

Девяткин В. Г., Метелева Н. Ю. О роли фитопланктона в формировании кислородного режи-

ма водоема в связи с климатическими вариациями // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 68–74.

Денисов Н. Е. Некоторые вопросы методики водолазных исследований донных сообществ // Океанология. 1972. Т. 12, № 5. С. 884–891.

Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Азовском море / Ред. Н. М. Книпович. М.: Шестой Октябрь, 1932. 496 с.

Количественные методы экологии и гидробиологии (Сб. науч. трудов, посв. памяти А. И. Баканова) / Ред. Г. С. Розенберг. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. 404 с.

Кравчук Е. С. Эколого-физиологические аспекты «цветения» воды синезелеными водорослями в двух разнотипных водохранилищах (район Красноярска): Автореф. дис. … канд. биол. наук. Борок, 2004. 24 с.

Крахмальный А. Ф. Динофитовые водоросли Украины (иллюстрированный определитель). Киев: Альтерпресс, 2011. 444 с.

Кривина Е. С. Трансформация фитопланктона малых водоемов урбанизированных территорий в условиях изменения антропогенной нагрузки: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Тольятти, 2018. 186 с.

Куликовский М. С., Глущенко А. М., Генкал С. И., Кузнецова И. В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.

Локтионова Е. Г., Яковлева Л. В. Определение содержания растворенного кислорода и биологического потребления кислорода для оценки качества речной воды // Экология и промышленность России. 2011. № 10. С. 34–35.

Матвеев В. И., Курносова (Важова) А. С., Катайкина О. И. Результаты гидрохимического мониторинга озера Ханка в 2016–2018 годах // Тихоокеанская география. 2020. № 3. С. 47–55.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Отв. ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовской. М.: Наука, 1975. 240 с.

Мозжерин В. И., Ермолаев О. П., Мозжерин В. В. Река Казанка и ее бассейн. Казань: Orange key, 2012. 280 с.

Нестерова Д. А., Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И. Фитопланктон и гидрохимическая характеристика Азовского моря в летний период // Экология моря. 1988. Т. 29. С. 12–18.

Остроумов С. А. Восстановление нарушений на экологическом уровне: самоочищение воды и экологическая репарация // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2003. № 9. С. 104–111.

Пронина Г. И., Корягина Н. Ю., Терентьев П. В. Воздействие фитопланктона на кислородный режим рыбохозяйственного водоема в условиях низких температур // Вестник АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство. 2016. № 1. С. 52–61.

Рижинашвили А. Л. Показатели содержания органических веществ и компоненты карбонатной системы в природных водах в условиях интенсивного антропогенного воздействия // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Сер. 4, вып. 4. С. 90–101.

Салманов М. А. Экология и биологическая продуктивность Каспийского моря. Баку: Исмаил, 1999. 398 с.

Тучин С. В., Бренник Т. А. Гидрохимические показатели качества воды Шершневского водохранилища // Идеи молодых ученых – агропромышленному комплексу: естественнонаучные и математические дисциплины: Матер. студ. науч. конф. Института ветеринарной медицины. Челябинск, 2020. С. 224–228.

Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином, 2008. 512 с.

Шатрова О. В., Еремина Т. Р., Ланге Е. К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 129–140.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Afonina E. Yu., Tashlykova N. A., Kuklin A. P., Tsybekmitova G. Ts. Environmental features and dynamics of plankton communities in a mountain glacial moraine lake (Baikal lake basin, Russia) // Nature Conserv. Res. 2020. Vol. 5, no. 3. P. 23–36.

Akbaeva L. H., Mamytova N. S., Tulegenov E. A. Seasonal dynamics of self-cleaning ability of the Akmola region // Actual questions and innovations in science: Int. sci. conf. (Craiova, Romania. May. 2019). Craiova, 2019. P. 82–86.

Boyd C. E. Phytoplankton and its impact on water quality // Glob. Aquacult. Adv. 2017. P. 1–5.

Dekun H., Jiang H., Changwei L., Ying Sun, Fujin Zh., Khureldavaa O. Effects of environmental factors on nutrients release at sediment-water interface and assessment of trophic status for a typical shallow lake, Northest China // Hindawi Publ. Corporation the scientific world journal. 2013. No. 3. P. 1–16. doi: 10.1155/2013/716342

Falkowski P. G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles // Photosynthesis Res. 1994. Vol. 39. P. 235–258.

Gilmore K. L., Doubleday Z. A., Gillanders B. M. Prolonged exposure to low oxygen improves hypoxia tolerance in a freshwater fish // Conserv. Physiol. 2019. Vol. 7. P. 1–10.

Golam K. Global fish kills: causes and consequenses // ReserchGate. 2014. Vol. 26. P. 1–5.

Hupfer M., Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in Limnology // Int. Rev. Hydrobiol. 2008. Vol. 93, no. 4–5. P. 415–432. doi: 10.1002/iroh.200711054

Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2020. URL: http://www.algaebase.org (accessed: 16.01.2021).

Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales // Süβwasserflora von Mitteleuropa. Jena, etc.: Gustav Fischer, 1998. Bd. 19(1). 548 p.

Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales // Süβwasserflora von Mitteleuropa, 2005. Bd. 19(2). 759 p.

Lange-Bertalot H. (ed.). Diatomeenim Süβwasser-Benthos von Mitteleuropa. Koeltz Scientific Books, 2013. 908 p.

Lavaud J. Fast regulation of photosynthesis in Diatoms: mechanisms, evolution and ecophysiology // Functional plant science and biotechnology. 2007. No. 1. P. 267–287.

Preisig H. R. A modern concept of chrysophyte classification // Chrysophyte algae: Ecology, Phylogeny and Development. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. P. 47–74.

Smith D. W., Piedrahita R. H. The relation between phytoplankton and dissolved oxygen in fish ponds // Aquaculture. 1988. Vol. 68, no. 3. P. 249–265.

Peschek G. A. Photosynthesis and respiration of Cyanobacteria // The Phototrophic Prokaryotes. 1999. P. 201–209. doi: 10.1007/978-1-4615-4827-0_24

Popovsky J., Pfiester L. A. Dimophyceae (Dinoflagellida) // Süβwasserflora von Mitteleuropa. Jena, 1990. Bd. 6. 272 p.

Prihoda J., Tanaka A., Wilson B. M., Allen J., Tirichine L., Bowler C. Chloroplast-mitochondria cross-talk in diatoms // J. Exp. Bot. 2012. Vol. 63, iss. 4. P. 1543–1557.

Rocha R. A., Thomas S. M., Carvalho P., Gomes L. C. Modeling chlorophyll-a and dissolved oxygen concentration in tropical floodplain lakes (Parana River, Brasil) // Braz. J. Biol. 2009. Vol. 69, no. 2. P. 491–500.

Ruggiero M. A., Dennis P., Gordon D. P., Orrell T. M., Bailly N., Bourgoin T., Brusca R., Cavalier-Smith T., Guiry M. D., Kirk P. M. A higher level classification of all living organisms // PloS ONE. 2015. Vol. 10, no. 4. P. 1–60.

West J. A. Cryptophyta // Beaches and Coastal Geology. Encyclopedia of Earth Series. Springer, 1982. doi: 10.1007/0-387-30843-1_138

Поступила в редакцию 18.02.2021

References

Abramova K. I., Tokinova R. P. Mezhgodovaya dinamika letnego fitoplanktona v ust'evoi oblasti reki Kazanki (g. Kazan') [Interannual dynamics of summer phytoplankton in the mouth region of the Kazanka River (Kazan)]. *Samarskaya Luka: probl. regional'noi i global'noi ekol.* [Samara Luka: Probl. of Regional and Global Ecol.]. 2020. No. 3. P. 89–94.

Aleksandrov S. V. Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie i zagryaznenie Kurshskogo i Vislinskogo zalivov Baltiiskogo morya [Modern ecological condition and contamination of the Curonian and Vistula lagoons of the Baltic Sea]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2011. No. 11. P. 3–9.

Arbuzova L. L., Levenets I. R. Vodorosli [Algae]. Vladivostok: Dalrybvtuz, 2010. 177 p.

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Prognoz razvitiya fitoplanktona v proektiruemom nizkonapornom vodokhranilishche na r. Don [Forecast of phytoplankton development in the projected low-pressure reservoir on the Don River]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2020. Vol. 47, no. 1. P. 57–67.

Devyatkin V. G., Meteleva N. Yu. O roli fitoplanktona v formirovanii kislorodnogo rezhima vodoema v svyazi s klimaticheskimi variatsiyami [On the role of phytoplankton in the formation of the oxygen regime of the reservoir in connection with climatic variations]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2012. No. 12. P. 68–74.

Denisov N. E. Nekotorye voprosy metodiki vodolaznykh issledovanii donnykh soobshchestv [Some questions of the methodology of diving studies of bottom communities]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1972. Vol. 12, no. 5. P. 884–891.

Gidroekologiya ust'evykh oblastei pritokov ravninnogo vodokhranilishcha [Hydroecology of estuarine areas of tributaries of a lowland reservoir]. Ed. A. V. Krylov. Yaroslavl: Filigran, 2015. 466 p.

Gorokhova O. G. Fitoplankton ozernoi sistemy Kaban v 2011 godu [Phytoplankton of the Kaban lake system in 2011]. *Georesursy* [Georesources]. 2012. Vol. 7, no. 49. P. 24–28.

Khalafyan A. A. Statistica 6. Statisticheskii analiz dannykh [Statistica 6. Statistical analysis of data]. Moscow: Binom, 2008. 512 p.

Knipovich N. M. Gidrologicheskie issledovaniya v Azovskom more [Hydrological studies in the Azov Sea]. Moscow: The Sixth October, 1932. 496 p.

Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii (Sb. nauch. trudov, posv. pamyati A. I. Bakanova) [Quantitative methods of ecology and hydrobiology (Proceed. dedicated to the memory of A. I. Bakanov)]. Ed. G. S. Rosenberg. Tolyatti: SAMNTS RAS, 2005. 404 p.

Krakhmal'nyi A. F. Dinofitovye vodorosli Ukrainy (illyustrirovannyi opredelitel'). [Dinophyte algae of Ukraine (an illustrated guide)]. Kiev: Alterpress, 2011. 444 p.

Kravchuk E. S. Ekologo-fiziologicheskie aspekty "tsveteniya" vody sinezelenymi vodoroslyami v dvukh raznotipnykh vodokhranilishchakh (raion Krasnoyarska): [Ecological and physiological aspects of water 'blooming' due to blue-green algae in two different types of reservoirs (Krasnoyarsk Region)]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Borok, 2004. 24 p.

Krivina E. S. Transformatsiya fitoplanktona malykh vodoemov urbanizirovannykh territorii v usloviyakh izmeneniya antropogennoi nagruzki [Phytoplankton transformation in small reservoirs of urbanized territories under conditions of changing anthropogenic load]: Summary of Phd (Cand. of Biol.) thesis. Tolyatti, 2018. 186 p.

Kulikovskii M. S., Glushchenko A. M., Genkal S. I., Kuznetsova I. V. Opredelitel' diatomovykh vodoroslei Rossii [An identification guide to diatoms of Russia]. Yaroslavl: Filigree, 2016. 804 p.

Loktionova E. G., Yakovleva L. V. Opredelenie soderzhaniya rastvorennogo kisloroda i biologicheskogo potrebleniya kisloroda dlya otsenki kachestva rechnoi vody [Determination of dissolved oxygen content and biological oxygen consumption for river water quality assessment]. *Ekol. i promyshlennost' Rossii* [Ecol. and Industry of Russia]. 2011. No. 10. P. 34–35.

Matveev V. I., Kurnosova (Vazhova) A. S., Kataikina O. I. Rezul'taty gidrokhimicheskogo monitoringa ozera Khanka v 2016–2018 godakh [Results of hydrochemical monitoring of Lake Khanka in 2016–2018]. *Tikhookeanskaya geografiya* [Pacific Geography]. 2020. No. 3. P. 47–55.

Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov [A technique for studying biogeocenoses of inland water bodies]. Ed. F. D. Mordukhai-Boltovskoi. Moscow: Nauka, 1975. 240 p.

Mozzherin V. I., Ermolaev O. P., Mozzherin V. V. Reka Kazanka i ee bassein [Kazanka River and its basin]. Kazan: Orange key, 2012. 280 p.

Nesterova D. A., Garkavaya G. P., Bogatova Yu. I. Fitoplankton i gidrokhimicheskaya kharakteristika Azovskogo morya v letnii period [Phytoplankton and hydrochemical characteristics of the Azov Sea in summer]. *Ekol. morya* [Ecol. of the Sea]. 1988. Vol. 29. P. 12–18.

Ostroumov S. A. Vosstanovlenie narushenii na ekologicheskom urovne: samoochishchenie vody i ekologicheskaya reparatsiya [Restoration of violations at the ecological level: self-purification of water and ecological repair]. *Vestnik RUDN. Ser. Ekol. i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bull. RUDN. Ser. Ecol. and Life Safety]. 2003. No. 9. P. 104–111.

Pronina G. I., Koryagina N. Yu., Terentyev P. V. Vozdeistvie fitoplanktona na kislorodnyi rezhim rybokhozyaistvennogo vodoema v usloviyakh nizkikh temperatur [The effect of phytoplankton on the oxygen regime of a fishery reservoir under low temperature conditions]. *Vestnik AGTU. Ser. Rybnoe khozyaistvo* [Vestnik Astrakhan St. Tech. Iniv. Ser. Fisheries]. 2016. No. 1. P. 52–61.

Rizhinashvili A. L. Pokazateli soderzhaniya organicheskikh veshchestv i komponenty karbonatnoi sistemy v prirodnykh vodakh v usloviyakh intensivnogo antropogennogo vozdeistviya [Indicators of the content of organic substances and components of the carbonate system in natural waters under conditions of intensive anthropogenic impact]. *Vestnik SPbGU* [Vestnik. St. Petersburg Univ.]. 2008. Vol. 4, no. 4. P. 90–101.

Salmanov M. A. Ekologiya i biologicheskaya produktivnost' Kaspiiskogo morya [Ecology and biological productivity of the Caspian Sea]. Baku: Ismail, 1999. 398 p.

Shatrova O. V., Eremina T. R., Lange E. K. Analiz izmenchivosti parametrov evtrofirovaniya v Finskom zalive po dannym naturnykh nablyudenii [Analysis of the variability of eutrophication parameters in the Gulf of Finland according to field observations]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. Russ. St. Hydrometeorol. Univ.]. 2016. No. 44. P. 129–140.

Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tolyatti: IEVB Russian Academy of Sciences, 2003. 463 p.

Tuchin S. V., Brennik T. A. Gidrokhimicheskie pokazateli kachestva vody Shershnevskogo vodokhranilishcha [Hydrochemical indicators of water quality of the Shershnevsky reservoir]. *Idei molodykh uchenykh – agropromyshlennomu kompleksu: estestvennonauchnye i matematicheskie distsipliny: Mater. stud. nauch. konf. Instituta veterinarnoi meditsiny* [Ideas of young scientists for agro-industrial complex: nat. sci. math. disciplines: Proceed. student sci. conf. Inst. Vet. Medicine]. Chelyabinsk, 2020. P. 224–228.

Valiev V. S., Ivanov D. V., Shagidullin R. R., Shamaev D. E., Mustafina L. K., Shurmina N. V., Abdullina F. M., Bogdanova O. A., Ziganshin I. I. Otsenka vklada zagryaznyayushchikh veshchestv v formirovanie klassa zagryaznennosti poverkhnostnykh vod [Estimation of pollutants contribution to the formation of the surface waters pollution class]. *Ross. zhurn. priklad. ekol.* [Russ. J. Appl. Ecol.]. 2018. No. 3. P. 57–64.

Afonina E. Yu., Tashlykova N. A., Kuklin A. P., Tsybekmitova G. Ts. Environmental features and dynamics of plankton communities in a mountain glacial moraine lake (Baikal lake basin, Russia). *Nature Conserv. Res.* 2020. Vol. 5, no. 3. P. 23–36.

Akbaeva L. H., Mamytova N. S., Tulegenov E. A. Seasonal dynamics of self-cleaning ability of the Akmola region. *Actual questions and innovations in science: Int. sci. conf. (Craiova, Romania. May. 2019).* Craiova, 2019. P. 82–86.

Boyd C. E. Phytoplankton and its impact on water quality. *Glob. Aquacult. Adv.* 2017. P. 1–5.

Dekun H., Jiang H., Changwei L., Ying Sun, Fujin Zh., Khureldavaa O. Effects of environmental factors on nutrients release at sediment-water interface and assessment of trophic status for a typical shallow lake, Northest China. *Hindawi Publ. Corporation the scientific world journal*. 2013. No. 3. doi: 10.1155/2013/716342. P. 1–16.

Falkowski P. G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis Res.* 1994. Vol. 39. P. 235–258.

Gilmore K. L., Doubleday Z. A., Gillanders B. M. Prolonged exposure to low oxygen improves hypoxia tolerance in a freshwater fish. *Conserv. Physiol.* 2019. Vol. 7. P. 1–10.

Golam K. Global fish kills: causes and consequences. *ReserchGate.* 2014. Vol. 26. P. 1–5.

Hupfer M., Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in Limnology. *Int. Rev. Hydrobiol.* 2008. Vol. 93, no. 4–5. P. 415–432. doi: 10.1002/iroh.200711054

Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2020. URL: http://www.algaebase.org (accessed: 16.01.2021).

Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales. *Süβwasserflora von Mitteleuropa*. Jena, etc.: Gustav Fischer, 1998. Bd. 19(1). 548 p.

Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales. *Süβwasserflora von Mitteleuropa.* 2005. Bd. 19(2). 759 p.

Lange-Bertalot H. (ed.). Diatomeenim Süβwasser-Benthos von Mitteleuropa. Koeltz Scientific Books, 2013. 908 p.

Lavaud J. Fast regulation of photosynthesis in Diatoms: mechanisms, evolution and ecophysiology. *Functional plant science and biotechnology*. 2007. No. 1. P. 267–287.

Preisig H. R. A modern concept of chrysophyte classification. *Chrysophyte algae: Ecology, Phylogeny and Development.* Cambridge: Cambridge University Press, 1995. P. 47–74.

Smith D. W., Piedrahita R. H. The relation between phytoplankton and dissolved oxygen in fish ponds. *Aquaculture*. 1988. Vol. 68, no. 3. P. 249–265.

Peschek G. A. Photosynthesis and respiration of Cyanobacteria. *The Phototrophic Prokaryotes.* 1999. P. 201–209. doi: 10.1007/978-1-4615-4827-0_24.

Popovsky J., Pfiester L. A. Dimophyceae (Dinoflagellida). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Jena, 1990. Bd. 6. 272 p.

Prihoda J., Tanaka A., Wilson B. M., Allen J., Tirichine L., Bowler C. Chloroplast-mitochondria cross-talk in diatoms. *J. Exp. Bot.* 2012. Vol. 63, iss. 4. P. 1543–1557.

Rocha R. A., Thomas S. M., Carvalho P., Gomes L. C. Modeling chlorophyll-a and dissolved oxygen concentration in tropical floodplain lakes (Parana River, Brasil). *Braz. J. Biol.* 2009. Vol. 69, no. 2. P. 491–500.

Ruggiero M. A., Dennis P., Gordon D. P., Orrell T. M., Bailly N., Bourgoin T., Brusca R., Cavalier-Smith T., Guiry M. D., Kirk P. M. A higher level classification of all living organisms. *PloS ONE.* 2015. Vol. 10, no. 4. P. 1–60.

West J. A. Cryptophyta. *Beaches and Coastal Geology. Encyclopedia of Earth Series*. Springer, 1982. doi: 10.1007/0-387-30843-1_138

Received February 18, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Абрамова Ксения Ивановна
научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087
эл. почта: kseniaiv@yandex.ru
тел.: (843) 2981505

Токинова Римма Петровна
заведующая лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087
эл. почта: r.tokin@rambler.ru
тел.: (843) 2981505

Водунон Наиля Робертовна
научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087
эл. почта: vodounonnr@gmail.ru
тел.: (843) 2981505

Шагидуллин Рифгат Роальдович
директор, д. х. н.
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087
эл. почта: Shagidullin_@mail.ru
тел.: (843) 2981505

Шурмина Надежда Васильевна
научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087
эл. почта: shurmina2015@yandex.ru
тел.: (843) 2981505

CONTRIBUTORS:

Abramova, Ksenia
Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: kseniaiv@yandex.ru
tel.: (843) 2981505

Tokinova, Rimma
Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: r.tokin@rambler.ru
tel.: (843) 2981505

Vodounon, Nailya
Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: vodounonnr@gmail.ru
tel.: (843) 2981505

Shagidullin, Rifgat
Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: Shagidullin_@mail.ru
tel.: (843) 2981505

Shurmina, Nadezhda
Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: shurmina2015@yandex.ru
tel.: (843) 2981505