

СУКЦЕССИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ОЗЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОМ (Г. КАЗАНЬ) ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ДНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

На основе многолетних наблюдений (2020–2023 гг.) анализируются изменения в составе и структуре фитопланктона озера Комсомольское (г. Казань, Республика Татарстан) после проведенных в 2019 г. мероприятий по его экологической реабилитации, включавших дноочистительные работы. Начальным этапом межгодовой сукцессии фитопланктона была гетеротрофная фаза с развитием фитофлагеллат (золотистых и динофитовых), переходящая в автотрофную фазу (зеленых и диатомовых). Представлен ход межгодовой сукцессии фитопланктона по уровню трофии, смене функциональных и морфологических групп. Проанализированы связи количественных показателей отделов сообщества с физическими показателями воды (прозрачностью, цветностью) и климатическими факторами (температурой воздуха, осадками). Оценка динамики количественных показателей сообщества, гидрохимических показателей, нормализованного вегетационного индекса характеризует экосистему водоема к заключительному году исследований как устойчивую.

Ключевые слова: фитопланктон; сукцессия; озеро Комсомольское; дноочистительные работы.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.2.28.41>

Введение

Городские водоемы, выполняющие важные рекреационные и природно-эстетические функции, нуждаются в контроле за их экологическим состоянием и факторами, оказывающими воздействие на качество вод. В ряде случаев для восстановления водоемов с нарушенным экологическим благополучием проводится их реабилитация, одним из методов которой является очистка дна от накопленных донных отложений. Несмотря на большой мировой опыт применения этого метода, существуют противоречивые мнения относительно его эффективности (Pithakpol, 2007; Павлова и др., 2011; Рубцова, Алемов, 2011; Cabrita, 2014; Герасимов, Синицкий, 2015; Jing et al., 2019). Негативные последствия дноочистительных работ проявляются во вторичном загрязнении воды извлекаемыми отложениями, увеличивающими ее мутность (Newell et al., 1998), вызывающими окисление сульфидов металлов (Caetano et al., 2003), кроме того, в состав отложений могут входить токсичные микроэлементы (Pan, Wang, 2012).

Фитопланктон рассматривается в качестве одного из индикаторов изменения качества воды, экологического состояния водных экосистем после дноочистительных работ и может использоваться для оценки эффективности проведенных

реабилитационных мероприятий (Rainbow, 2006; Paerl et al., 2007; Cabrita, 2014).

Озеро Комсомольское (55°51'26.75" с.ш., 49°13'37.91" в.д.) находится в черте города Казани (Татарстан) – одного из крупных промышленных центров Среднего Поволжья. Озеро представляет собой искусственно созданный в конце 1950-х гг. пруд, уровень воды в котором поддерживается перекачкой вод из артезианской скважины. Длина озера 320 м, ширина 50 м, площадь водной поверхности 1.73 га, средняя глубина 2.5–3 м. До проведения восстановительных работ системных гидробиологических исследований на озере не проводилось. По имеющимся в литературе данным, в начале 2000-х гг. фитопланктон озера был сформирован преимущественно зелеными водорослями (на 68%), по уровню биомассы сообщества водоем характеризовался как мезотрофный (Экология ..., 2005). За период своего существования озеро приобрело природоохранную ценность, обусловленную вселением редких видов харовых водорослей (*Chara contraria* Br. ex Kütz. и *Chara globularis* Thuill.), а также пузырчатки обыкновенной (*Utricularia vulgaris* L.), нуждающихся в постоянном контроле за состоянием их популяций на территории Татарстана (Токинова и др., 2019). Водоем относится к макрофитному типу со значительной степенью зарастания водной



Рис. 1. Озеро Комсомольское в период проведения дноочистительных работ в 2019 г. (а) и после – в 2022 г. (б)

Fig. 1. Komsomolskoye Lake during the dredging works in 2019 (a) and after – in 2022 (b)

растительностью. По приблизительным оценкам, до проведения дноочистительных работ площадь зарастания озера харофитами составляла около 60% от площади водного зеркала (Токинова и др., 2019).

Население использует озеро для купания, ловли рыбы и подкормки водоплавающих птиц. Вместе с тем, вода в озере не удовлетворяла санитарно-гигиеническим и экологическим нормативам, в донных отложениях отмечались превышения фонового содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов, в подледный период в воде фиксировались высокие концентрации сероводорода, отмечались случаи массовой гибели рыб (Иванов и др., 2019; Токинова, Сергеев, 2019). В связи с этим, летом 2019 г. на озере был проведен комплекс мероприятий по экологической реабилитации (рис. 1), включающий изъятие донных отложений по технологии «Geotube». Для сохранения популяций редких видов макроводорослей от негативного воздействия проводимых работ озеро полностью не осушалось (уровень воды был понижен на 1–1.5 м), а в его срединной части с помощью геоткани был отгорожен участок с фитocenозом *Chara* spp. (около 25–30% от площади озера). Для оценки эффективности проведенных мероприятий в последующий период на озере проводились наблюдения за изменениями в экосистеме водоема, состоянием водной растительности и фитопланктонного сообщества.

Цель данной работы – исследование изменений в составе и структуре фитопланктона в процессе восстановления экосистемы оз. Комсомольское после проведения дноочистительных работ.

Материалы и методы исследования

Исследования оз. Комсомольское проводили с июня по август в течение четырех лет, с 2020 по 2023 гг. Пробы фитопланктона отбирали в первую и третью декады месяца из поверхностного слоя воды на двух станциях, расположенных в восточ-

ной и западной частях озера. Всего отобрано 38 проб. В июне 2022 и 2023 гг. дополнительно проведены отборы воды для проведения химико-аналитических измерений.

Сбор и обработка фитопланктона проведены по общепринятым методикам (Методика ..., 1975). Пробы, зафиксированные раствором Люголя, концентрированы прямой фильтрацией через мембранные фильтры «Владипор» №9 (диаметр пор 0.4 мкм) с применением вакуумного насоса. Идентификация видового состава водорослей, подсчет их численности и измерение линейных размеров клеток проведены в камере Горяева под микроскопами Микромед-2 и МБИ-11 с фазовым контрастом КФ-4 в трех повторностях. Биомасса определялась счетно-объемным методом. Таксономический состав диатомовых уточняли под световым микроскопом в постоянных препаратах, приготовленных с применением смолы Naphrax, с использованием масляной иммерсии. Подготовку диатомовых водорослей для световой микроскопии осуществляли методом холодного сжигания (Методика ..., 1975). Для идентификации видовой принадлежности водорослей использованы определители серий «Определитель пресноводных водорослей СССР» (1951–1982 гг.) и «Süßwasserflora von Mitteleuropa» (1983–2005 гг.).

Эколого-географическая характеристика видов дана по С.С. Бариновой (Баринова и др., 2006; Корнева, 1993). Сапробиологический анализ проведен по методу Пантле и Букка в модификации В. Сладечека (Sládeček, 1973). К доминирующим отнесены виды/отделы, численность (N) или биомасса (B) которых составила не менее 10% от общей. Индексы видового разнообразия Шеннона (H) и выравненности Пиелу (E) рассчитаны по численности (Шитиков и др., 2011). Характеристика трофического состояния водоема дана по классификации И.С. Трифионовой (1990). Функциональные группы (FG) фитопланктона выде-

лены по классификации C.S. Reynolds (Reynolds et al., 2002; Padisak, 2009; Корнева, Соловьева, 2021), морфологические (MBFG) – по С. Kruk (Kruk, Segura, 2012). Учитывая, что состояние популяции определяется совокупностью количественных параметров, в анализе данных применили комбинированные показатели, включающие численность и биомассу. Для оценки размерной структуры фитопланктона использовали соотношение B/N (Охапкин и др., 2022), для оценки его количественных характеристик – индекс плотности I_p , расчет которого проводили по формуле $(B \times N)^{1/2}$ (Шитиков и др., 2011; Абрамова и др., 2021). Метеорологические показатели получены из открытых Интернет-источников (<http://www.pogodaiclimat.ru>). Оценку нормальности распределения данных проводили с использованием критерия Шапиро-Уилка, анализ различия параметров при нормальном распределении – t -критерия Стьюдента, при отличном от нормального – критерия Манна-Уитни. Сходство данных оценивали методом попарных сравнений с помощью индекса Серенсена (Шитиков и др., 2011). При кластеризации данных использовали метод Варда, в качестве метрики – нормированное евклидово расстояние, выраженное в процентах. Для оценки изменчивости структуры фитопланктона проведен дискриминантный анализ, где зависимой переменной был год наблюдений (по данным за июнь). В качестве независимых переменных принимались количественные параметры (численность, биомасса, индекс плотности, размерная структура) и показатели видовой разнообразия (индексы Шеннона и Пиелу, удельное видовое богатство). Анализ взаимосвязи параметров с ненормальным распределением проведен с применением коэффициента Спирмена. Расчеты выполнены в программе Statistica 10. Характеристики ионного состава и жесткости воды даны по классификации О.А. Алекина (1970). В качестве нормативных значений содержания химических веществ в воде использованы предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}), хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{кб}) (Приказ ..., 2016; СанПиН 1.2.3685–21).

Для анализа восстановления экосистемы озера по сравнению с предшествующим периодом рассчитан нормализованный вегетационный индекс (NDVI) озера для первой декады июня с 2018 по 2023 гг. NDVI, как показатель количества фотосинтетической активной биомассы, все чаще используется в работах для оценки развития фитопланктона (Zhao, 2003; Gao et al., 2015) и мониторинга процессов эвтрофирования водоемов (Tian

et al., 2010). Вычисления NDVI (Rouse et al., 1973; Поддубный и др., 2022) проведены путем дешифровки мультиспектральных спутниковых снимков Landsat 7–8 (US Geological Survey) с облачностью менее 20%, с использованием двух спектральных слоев NIR (отражение в ближней инфракрасной) и RED (отражение в красной области спектра) по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED).$$

Построение индексной карты и расчет вегетационного индекса с применением зональной статистики выполнены в геоинформационной системе QGIS 2.18.

Результаты и их обсуждение

Гидрохимическая характеристика. Вода в озере сульфатного класса кальциевой группы, жесткая, имеет повышенную минерализацию (табл. 1). Глубина озера на станциях отбора проб варьировала в пределах 1–4 м. В межгодовой динамике отмечено увеличение прозрачности воды (по данным за июнь: 2021 г. – 0.9–1.3 м, 2022 г. – 1.5 м, 2023 г. – 2.8–2.9 м). В 2022–2023 гг. наблюдается благоприятный кислородный режим воды, содержание биогенных элементов и органического вещества в пределах нормы, увеличение значений показателей компонентного состава главных ионов и электропроводности, снижение ХПК и БПК₅.

Погодные условия. В летний период 2020 г. среднемесячная температура воздуха в Казани составила +16.8...+22.2 °С (отклонение от нормы составило -1.3...+2.0 °С), в 2021 г. – +22.0...+22.4 °С (+1.5...+4.1 °С), в 2022 г. – +18.3...+23.3 °С (-0.2...+5.0 °С), в 2023 г. – +18.3...+20.5 °С (-1.7...+2.3 °С); количество выпавших осадков в 2020 г. – 71–98 мм (106–162% от нормы), в 2021 г. – 9–81 мм (17–129%), в 2022 г. – 0–86 (0–138%), в 2023 г. – 9–57 мм (16–92%). Условия вегетационного периода в 2020 г. были прохладными и многоводными, по сравнению с последующими годами достоверно различались по количеству выпавших осадков ($p=0.044-0.049$). По значениям климатических факторов 2021 и 2022 гг. были самые теплые; 2023 г. – прохладным и маловодным. Наиболее теплым и засушливым периодом выдался август 2022 г., когда среднемесячная температура воздуха достигала 23.3 °С (на +5 °С выше нормы). Начиная с первой декады и до конца августа сохранялась устойчивая теплая и сухая погода.

Характеристика фитопланктона. В составе фитопланктона оз. Комсомольское обнаружен 81 вид из 7 систематических отделов, в том числе Cyanoprokaryota (15% от общего числа видов),

Таблица 1. Гидрохимические параметры качества вод озера в июне 2022–2023 гг.
Table 1. Hydrochemical parameters of lake water quality in June 2022–2023

Показатели Indicators	ПДК /ПДК _{тм} ^{рх} /МРС _{тм} ^{кб} /МРС _{сд} ^{кб}	2022 г.	2023 г.
Компонентный состав главных ионов The component composition of the main ions			
Жесткость, °Ж Hardness, °F	7–10	7.7	10.4
Кальций, мг/дм ³ Calcium, mg/dm ³	180	104.4	129.0
Магний, мг/дм ³ Calcium, mg/dm ³	40	30.3	49.0
Гидрокарбонаты, мг/дм ³ Bicarbonates, mg/dm ³	–	166.0	206.0
Хлориды, мг/дм ³ Chlorides, mg/dm ³	300	7.09	9.9
Сульфаты, мг/дм ³ Sulfates, mg/dm ³	100/500	240.0	273.0
Физические показатели Physical indicators			
Температура, °С Temperature, °С	–	19.6	
Прозрачность, м Transparency, m	–	1.5	
Электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, МСМ/cm	–	781.8	1125
Сухой остаток, мг/дм ³ Dry residue, mg/dm ³	1000/1500	602.0	728
рН, ед. рН pH, unit pH	6.5–8.5	8.22	7.87
Биогенные и органические вещества Biogenic and organic substances			
Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /дм ³ Permanganate index, mgO ₂ /dm ³	–	3.73	–
ХПК, мгО ₂ /дм ³ COD, mgO ₂ /dm ³	30	16.5	6.72
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	2.1/4	3.6	1.92
Аммоний ион, мг/дм ³ Ammonium ion, mg/dm ³	0.5	0.007	0.044
Нитриты, мг/дм ³ Nitrites, mg/dm ³	0.08/3.0	0.030	0.021
Фосфаты, мг/дм ³ Phosphates, mg/dm ³	0.2	0.022	0.013
Железо общее, мг/дм ³ Total iron, mg/dm ³	0.1	0.11	0.069
АСПАВ, мг/дм ³ Anionic synthetic surfactants, mg/dm ³	0.1	0.027	–
Нефтепродукты, мг/дм ³ Oil hydrocarbons, mg/dm ³	0.05	0.02	–
Газовый режим Gas mode			
Растворенный кислород, мгО ₂ /дм ³ Dissolved oxygen, mgO ₂ /dm ³	не менее 6.0 at least 6.0	20.6	–
Сероводород, мг/дм ³ Hydrogen sulfide, mg/dm ³	0.05	0.0007	–

Chrysophyta (8%), Bacillariophyta (39%), Chlorophyta (30%), Dinophyta (4%), Cryptophyta и Euglenophyta (по 2%). Все виды водорослей являются широко распространенными (космополитами). По принадлежности к биотопам среди них выде-

ляются планктонные, литоральные, обрастатели и бентосные формы. По отношению к количеству растворенных солей большинство видов, имеющих индикаторную значимость, являются пресноводными. Преимущественно развиваются ви-

ды-индикаторы β -мезосапробных условий; встречаются α , α - β , β - α – мезосапробы и олиго- β -мезосапробы.

В период исследований доминантами в фитопланктонном сообществе выступали представители 11 функциональных групп: В (*Handmannia comta* (Ehrenberg) Kociolek & Khursevich), D (*Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère), E (*Dinobryon divergens* Imhof, виды р. *Kephyrion* и р. *Pseudokephyrion*), J (*Crucigenia rectangularis* (Nägeli) Gay, *Lemmermannia tetrapedia* (Kirchner) Lemmermann, виды р. *Scenedesmus*), Lo (*Merismopedia tenuissima* Lemmermann, *Peridiniopsis quadridens* (F.Stein) Bourrelly, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák), M (*Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing и *Microcystis flos-aquae* (Wittrock) Kirchner), P (*Fragilaria crotonensis* Kitton), X1 (*Monoraphidium circinale* (Nygaard) Nygaard), X2 (*Komma caudata* (L. Geitler) D.R.A. Hill), X3 (виды р. *Chromulina*), Y (виды р. *Cryptomonas*). Доминировали виды, характерные для мелководных мезотрофных и эвтрофных вод, толерантные к световому лимитированию (В, J, P, Y), чувствительные к перемешиванию (X2, M, Lo) и стратификации (В, P); реагирующие на дефицит кремния (В, P), биогенных веществ (D) и углерода (E). Среди доминирующих таксонов выделены 5 морфологических групп: мелкие жгутиковые виды с кремнистыми структурами экзоскелета (II, золотистые водоросли); крупные одноклеточные и колонии, не имеющие газовых вакуолей, жгутиков, гетероцист, слизистых и кремнистых экзоскелетных структур (IV, зеленые); одноклеточные жгутиковые виды (V, динофитовые, криптофитовые); безжгутиковые организмы с кремнистым экзоскелетом (VI, диатомовые); виды, образующие слизистые колонии (VII, цианопрокариоты).

В июне удельное видовое богатство фитопланктона варьировало от 6 до 17 видов в пробе, было близким по станциям, но различалось в годовой динамике ($p=0.0001$) с наибольшими значениями в 2023 г. (17 ± 1 против 9 ± 1). Значения индекса Шеннона варьировали от 1.37 ± 0.89 до 3.15 ± 0.27 бит/экз., Пиелу – от 0.49 ± 0.09 до 0.85 ± 0.001 . Установлено, что значения видового разнообразия и выравненности статистически были близки в 2021–2022 гг. и различались с 2020 и 2023 гг. ($p<0.005$).

Активное развитие золотистых, диатомовых и зеленых водорослей приходилось преимущественно на начало лета, цианопрокариот – на август. По численности преобладали: среди зеленых водорослей – *Crucigenia rectangularis*, *Lemmermannia tetrapedia*, *Scenedesmus quadricauda* Chodat, *Monoraphidium circinale*, золотистых –

Dinobryon divergens, виды р. *Chromulina*, виды р. *Kephyrion* и р. *Pseudokephyrion*, цианопрокариот – *Microcystis aeruginosa*, *M. flos-aquae*, *Merismopedia tenuissima*, *Coelomoron pusillum* (Van Goor) Komárek, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák. Пик численности фитопланктона (118.91 ± 53.72 млн кл./л) отмечен в августе 2022 г. в условиях устойчивой теплой и сухой погоды, в период «цветения» воды в озере, обусловленном цианопрокариотами *M. aeruginosa* и *M. flos-aquae*. Нарастание численности отмечалось в начале августа с высокими значениями в конце месяца. Наименьшие показатели численности фитопланктона отмечены в июне 2023 г. (3.63 ± 1.02 млн кл./л).

По биомассе преимущественно преобладали диатомовые (*Ulnaria ulna*, *Fragilaria crotonensis*, *Handmannia comta*), динофитовые (*Peridiniopsis quadridens*) и криптофитовые водоросли (виды р. *Cryptomonas*). Пик биомассы фитопланктона отмечался в августе 2022 г. (7.79 ± 3.83 мг/л) с участием диатомовых, динофитовых, криптофитовых и цианопрокариот. Также высокая биомасса была отмечена в начале лета 2020 г. (5.55 ± 0.01 мг/л), в период «цветения» воды золотистыми и динофитовыми водорослями (по 40% от общей биомассы). Трофический статус водоема в первые три года наблюдений соответствовал эвтрофно-мезотрофному типу; эпизодически (в период устойчивой теплой и сухой погоды) – эвтрофии–высокоэвтрофии. На четвертый год исследований (2023 г.) – олиготрофии.

Межгодовая изменчивость фитопланктона. На следующий год после проведения дноочистительных работ (июнь 2020 г.) в озере зафиксировано массовое развитие золотистых (95% от общей численности и 40% от общей биомассы, с доминированием *D. divergens* и видов р. *Chromulina*) и динофитовых водорослей (40% от общей биомассы, *Parvodinium umbonatum* (Stein) Carty, *Peridiniopsis quadridens*), что привело к окрашиванию воды в желтовато-коричневый цвет. Общая численность фитопланктона составила 32.7 ± 5.3 млн кл./л, биомасса – 5.5 ± 0.4 мг/л (рис. 2).

Доля сопутствующих отделов (криптофитовых, диатомовых, зеленых и цианопрокариот) не превышала 10% от общей. Биомасса фитопланктона соответствовала эвтрофным условиям. Показатели видового разнообразия соответствовали низким значениям: индекс Шеннона – 1.69 бит/экз., индекс Пиелу – 0.53. В фитопланктоне преимущественно развивались представители групп E, X3, Lo и II, V (табл. 2). Относительно низкое значение соотношения общей биомассы и численности (0.17) свидетельствовало о развитии

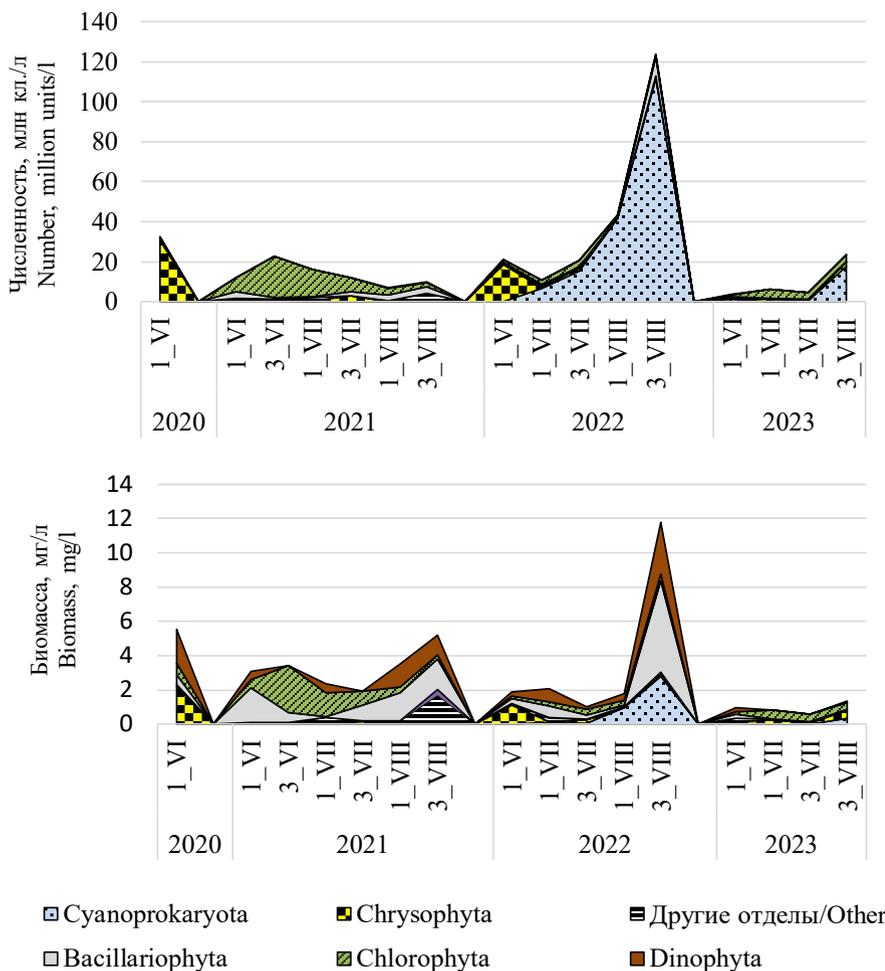


Рис. 2. Межгодовая динамика (2020–2023 гг.) численности и биомассы фитопланктона оз. Комсомольское в первой (1) и третьей (3) декадах летних месяцев (VI–VIII)

Fig. 2. Interannual dynamics (2020–2023) of the abundance and biomass of phytoplankton in the Komsomolskoye Lake in the first (1) and third (3) decades of the summer months (VI–VIII)

мелкогабаритных видов. Индекс плотности был высок (13.48).

В июне 2021 г. доминирующий состав был представлен зелеными (56% от общей численности, 15% от общей биомассы) и диатомовыми водорослями (30% и 65%, соответственно) с преобладанием *Crucigenia rectangularis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Ulnaria ulna*, *Fragilaria crotonensis* и *Handmannia compta*. Доля сопутствующих отделов планктонных водорослей (золотистых, динофитовых, криптофитовых и цианопрокариот) не превышала 10% от общей. Цвет воды имел зеленоватый оттенок. Количественные показатели фитопланктона существенно снизились по сравнению с предыдущим годом. Общая численность составила 12.12 млн кл./л, биомасса – 3.09 мг/л. Уровень биомассы фитопланктона соответствовал мезотрофным условиям. Повысились показатели видового разнообразия (индекс Шеннона составил 2.28 бит/экз., индекс Пиелу – 0.78). В

фитопланктоне увеличилось разнообразие представителей функциональных групп В, D, Р, J, Lo и IV, V и VI. По сравнению с предыдущим годом развивались более крупные виды водорослей, что отразилось на увеличении соотношения общей биомассы и численности (0.25). Индекс плотности фитопланктона значительно снизился (6.11).

В июне 2022 г. отмечено очередное повышение доли золотистых водорослей в фитопланктоне (89% от общей численности и 59% от общей биомассы) с преобладанием *D. divergens* и видов р. *Kephyrion*, *Pseudokephyrion*. Однако доля динофитовых от общей биомассы значительно снизилась по сравнению с первым годом наблюдений (12% против 40%). Цвет воды сохранил зеленоватый оттенок. Доля диатомовых от общей биомассы составила 16%, вклад других сопутствующих отделов планктонных водорослей (зеленых, криптофитовых и цианопрокариот) не превышал 5%. По сравнению с предыдущим годом в сообществе доминировали мелкоклеточные формы золотистых водорослей, наблюдался рост общей численности (20.92 млн кл./л), снижение биомассы (1.88 мг/л), уменьшение размерности (0.09). Изменение индекса плотности было статистически недостоверно. Понизились показатели видового разнообразия (индекс Шеннона – 1.56 бит/экз., индекс Пиелу – 0.45). Изменился состав морфологических и функциональных групп.

В июне 2023 г. отмечаются самые низкие значения количественных показателей фитопланктона за четыре года исследований. На порядок снижается численность (3.63 млн кл./л), биомасса (0.98 мг/л) и индекс плотности (1.88); увеличивается размерная структура сообщества (0.27). В сообществе преобладают диатомовые (с доминированием *Handmannia compta*), криптофитовые (виды р. *Cryptomonas*), динофитовые (*Peridiniopsis quadridens*) и зеленые (*Monoraphidium circinale*) водоросли. Отмечено достоверное повышение

Таблица 2. Изменение структурных показателей фитопланктона оз. Комсомольское в вегетационный период 2020–2023 гг.
Table 2. Changes in the structural parameters of the phytoplankton of the Komsomolskoye Lake in the growing season 2020–2023

Год Year	Месяц Month	Декада Decade	$\frac{N}{B}$	$\frac{FG}{MBFG}$	B/N	Ip	H	E
2020	VI	1	$\frac{32.74 \pm 12.5}{5.55 \pm 0.01}$	<u>E, X3, Lo</u> II, V	0.17	13.48	1.69 ± 0.28	0.53 ± 0.07
2021	VI	1	$\frac{12.12 \pm 7.08}{3.09 \pm 0.60}$	<u>B, D, P, J, Lo</u> IV, V, VI	0.25	6.11	2.28 ± 0.28	0.78 ± 0.07
		3	$\frac{17.14 \pm 4.28}{3.25 \pm 0.36}$	<u>X1, J</u> IV	0.19	7.74	1.40 ± 0.04	0.44 ± 0.04
	VII	1	$\frac{16.15 \pm 4.27}{2.36 \pm 0.01}$	<u>X1, X2, Lo</u> IV, V	0.14	6.17	1.92 ± 0.51	0.66 ± 0.11
		3	$\frac{14.63 \pm 2.65}{2.13 \pm 0.24}$	<u>E, D, X1, J</u> II, IV, VI	0.14	5.56	2.46 ± 0.14	0.82 ± 0.06
	VIII	1	$\frac{7.04 \pm 1.17}{3.52 \pm 1.36}$	<u>D, J, X1, Lo, Y</u> IV, V, VI	0.50	4.97	2.39 ± 0.01	0.85 ± 0.01
		3	$\frac{8.59 \pm 1.84}{4.38 \pm 1.31}$	<u>X2, Y, D, Lo, J</u> IV, V, VI	0.51	6.14	2.58 ± 0.52	0.79 ± 0.01
2022	VI	1	$\frac{20.92 \pm 9.07}{1.88 \pm 0.68}$	<u>E, D, Lo</u> II, V, VI	0.09	6.26	1.56 ± 0.28	0.45 ± 0.06
	VII	1	$\frac{10.85 \pm 4.91}{2.06 \pm 0.97}$	<u>M, Lo, X1, B</u> IV, V, VI, VII	0.19	4.72	2.93 ± 0.22	0.76 ± 0.05
		3	$\frac{20.70 \pm 10.62}{1.59 \pm 0.48}$	<u>M, E, D, X1, J, Lo,</u> <u>B</u> II, IV, V, VI, VII	0.07	5.75	2.23 ± 0.70	0.56 ± 0.18
	VIII	1	$\frac{43.40 \pm 30.39}{1.77 \pm 0.60}$	<u>M, Lo</u> V, VII	0.04	8.75	1.37 ± 0.89	0.36 ± 0.23
		3	$\frac{118.91 \pm 53.72}{7.79 \pm 3.83}$	<u>M, D</u> VI, VII	0.06	30.39	1.82 ± 0.39	0.49 ± 0.09
2023	VI	1	$\frac{3.63 \pm 1.02}{0.98 \pm 0.17}$	<u>B, Lo, X1, J</u> IV, V, VI	0.27	1.88	3.15 ± 0.27	0.78 ± 0.07
	VII	1	$\frac{6.19 \pm 1.47}{0.84 \pm 0.27}$	<u>E, X1</u> II, IV	0.14	2.28	1.61 ± 0.12	0.54 ± 0.03
		3	$\frac{4.71 \pm 0.31}{0.58 \pm 0.02}$	<u>J, X1</u> IV	0.12	1.65	2.69 ± 0.21	0.78 ± 0.06
	VIII	3	$\frac{23.45 \pm 2.35}{1.36 \pm 0.15}$	<u>E, J, Lo</u> II, IV, VII	0.06	5.64	1.50 ± 0.07	0.44 ± 0.04

Примечание. VI, VII и VIII – июнь, июль и август; N – численность общая, млн кл./л; B – биомасса общая, мг/л; FG и MBFG – функциональные и морфологические группы; B/N – соотношение биомассы и численности; Ip, H и E – индексы плотности, Шеннона (бит/экз.) и Пielу

Note. VI, VII and VIII – June, July and August; N – total population, million cells/l; B – total biomass, mg/l; FG and MBFG (below the line) – functional and morphological groups; B/N is the ratio of biomass to abundance; Ip, H and E are density indices, Shannon (bits/copies) and Pielu

индексов видового разнообразия (3.15 бит/экз.) и выравненности (0.78) по сравнению с другими годами наблюдений. Цвет воды приобрел голубоватый оттенок. В планктоне преобладают виды, чувствительные к перемешиванию и стратификации, толерантные к световому лимитированию (B, Lo, X1, J).

В вегетационный период 2021–2022 гг. биомасса фитопланктона соответствовала мезотрофным–эвтрофным условиям, 2023 г. – олиготрофным. В июле–августе 2021 г. значительный вклад в количественные показатели сообщества вноси-

ли зеленые и диатомовые (до 40–60% от общей). Немаловажна роль золотистых, динофитовых и криптофитовых, однако их доля в общую численность/биомассу составила не более 10% от общей. В 2022 г. основу сообщества формировали цианопрокариоты (70–94% от общей численности и 5–39% от общей биомассы). Значимый вклад в биомассу сообщества в этот период вносили диатомовые (24–56% от общей), зеленые (7–16%) и динофитовые (24–35%). Август 2022 г. выдался теплым и засушливым, отличался от 2021 г. мас-совым развитием в фитопланктоне цианопрока-

риот *Microcystis aeruginosa* и *M. flos-aquae*. Их концентрация в поверхностном слое воды достигала 111 млн кл./л. В 2023 г. основная роль в формировании количественных показателей сообщества принадлежала зеленым (*Monoraphidium circinale*, *Lemmermannia tetrapedia*) и золотистым водорослям (*Dinobryon divergens*). В августе отмечено увеличение роли цианопрокариот в планктоне (75% от общей численности, 25% от общей биомассы) с преобладанием *Snowella lacustris*. В пробах также встречались клетки р. *Microcystis*, но их доля не превышала 2% от общей численности, биомассы фитопланктона.

Нормализованный вегетационный индекс. По данным дешифровки спутниковых снимков за 2018–2023 гг. в пределах оз. Комсомольское наблюдалось варьирование средних значений NDVI от максимального за год до проведения дноочистительных мероприятий до минимального в 2019 г. В первые два года после проведения дноочистительных работ показатель индекса и его диапазон значений увеличился на порядок, в последующие годы (2021–2023 гг.) – динамика NDVI вышла на плато (табл. 3). Учитывая межгодовую динамику развития фитопланктона, вероятно, основной вклад в показатель значения NDVI озера вносила макрофитная растительность. Анализ данных за последние три года показал, что наибольшие значения индекса (0.20–0.36, характеризующие по шкале NDVI растительность), распределяются по водному зеркалу преимущественно вдоль береговой линии.

Последствия работ по изъятию донных отложений для экосистемы водных объектов сложны и противоречивы (Pithakpol, 2007; Jing et al., 2019). Подобного рода вмешательство может способствовать изменению качества воды, влиять на уровень эвтрофикации водоема, регулировать структуру и состав фитопланктона за счет снижения содержания фосфора в донных отложениях эвтрофных озер (Сао et al., 2007). При этом они могут оказать лишь краткосрочный положительный эффект с последующим ухудшением качества вод и усилением эвтрофирования. Причиной ухудшения могут быть неправильно проведенные мероприятия, повлекшие увеличение количества взвешенных веществ в толще воды (Pithakpol, 2007), игнорирование экологических мер по контролю биомассы икhtiологической составляющей и интродукции макрофитов (Jing et al., 2019).

Основные изменения в состоянии экосистемы оз. Комсомольское после проведения экореставрации проявлялись в изменении цвета и прозрачности воды, состава и структуры фитопланктона, значений вегетационного индекса водоема. В пер-

вый год (2020 г.) исследований желтовато-коричневый цвет воды был обусловлен массовым развитием миксотрофных фитофлагеллят (золотистых и динофитовых водорослей). Численность золотистых в этот период превышала 30.0 млн кл./л и динофитовых – 0.5 млн кл./л, биомасса – более 2.0 и 1.9 мг/л. В условиях светового лимитирования, связанного с ростом органического вещества, конкурентное преимущество получают миксотрофные фитофлагелляты, подвижные жгутиковые формы, способные к смешанному типу питания (автотрофии и фаготрофии). Развитие гетеротрофных компонентов фитопланктона, вероятно, обусловлено высоким соотношением бактериальной и первичной продукции планктона, превалированием деструкционных процессов над продукционными, возрастанием численности гетеротрофного бактериопланктона (Корнева, Соловьева, 2017). Сопоставляя собственные (увеличение обилие миксотрофов, биомасса гетеротрофов превышала биомассу автотрофов в 2020 г.) и литературные данные (Корнева, 2015; Корнева, Соловьева, 2017), можно констатировать, что в первый год после проведения дноочистительных мероприятий, фитопланктон оз. Комсомольское находился на стадии прогрессивной сукцессии, в гетеротрофной фазе.

В последующие годы продолжалась основная сукцессия – гетеротрофная фаза сменялась на фазу развития фототрофов. Отмечалось изменение оттенка воды в водоеме (от желтовато-коричневого до зеленого, голубоватого). Снижалось обилие динофитовых и золотистых, увеличивался вклад зеленых и диатомовых водорослей. Состав доминирующих видов не был постоянным на протяжении вегетационного периода и варьировал в разные годы. Последовательная смена сообществ выглядела следующим образом: в 2020 г. преобладали золотистые и динофитовые, в 2021 г. – зеленые и диатомовые, в 2022 г. – золотистые, динофитовые и диатомовые, в 2023 г. – диатомовые, динофитовые, криптофитовые и зеленые. Перераспределение в сообществе сопровождалось снижением количественных показателей фитопланктона (рис. 3), увеличением значений индексов видового разнообразия и выравненности, прозрачности воды. В 2023 г. отмечены наименьшие показатели обилия фитопланктона, наибольшая прозрачность воды.

Согласно анализу динамики трофического состояния водоема, эвтрофная стадия (2020 г.) сменялась на мезотрофную (2021–2022 гг.) и на олиготрофную (2023 г.). На эвтрофной стадии сукцессии доминирующий состав фитопланктона определялся видами *Dinobryon divergens*,

Таблица 3. Динамика значений нормализованного вегетационного индекса (NDVI) оз. Комсомольское в июне 2018–2023 гг.

Table 3. Dynamics of normalized vegetation index (NDVI) values in Komsomolskoye Lake in June 2018–2023

Год Year	NDVI	
	Среднее значение The average value	Диапазон значений Range of values
2018	0.18±0.02	0.02–0.47
2019	-0.07±0.01	-0.21–0.14
2020	0.08±0.02	-0.08–0.35
2021	0.11±0.02	-0.08–0.39
2022	0.11±0.01	-0.01–0.31
2023	0.11±0.01	-0.02–0.36

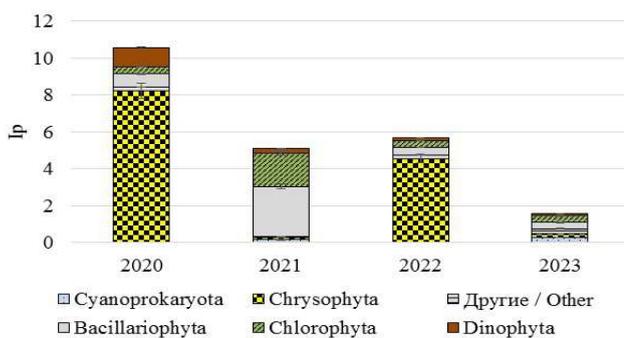


Рис. 3. Индекс плотности (I_p) отделов фитопланктона оз. Комсомольское в июне 2020–2023 гг.

Fig. 3. Density index (I_p) of the phytoplankton taxones in Komsomolskoye Lake in June 2020–2023

рода *Chromulina*, *Parvodinium umbonatum* и *Peridiniopsis quadridens*. При переходе в мезотрофное состояние основу планктонных комплексов создают *D. divergens*, *Crucigenia rectangularis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Ulnaria ulna*, *Fragilaria crotonensis*, *Handmannia comta* и виды родов *Kephyrion* и *Pseudokephyrion*. В олиготрофной стадии сукцессии преимущественно развивались *Handmannia comta*, *Monoraphidium circinale*, *Peridiniopsis quadridens* и виды рода *Cryptomonas*.

Установлены некоторые корреляционные связи биотических и абиотических параметров. Прозрачность воды коррелировала ($p < 0.05$) с индексом плотности фитопланктона (-0.80), цвет воды – с численностью/биомассой золотистых, динофитовых водорослей (-0.78–0.81). Анализ выявил статистически слабые и незначимые связи количественных показателей доминирующих

отделов (золотистые, динофитовые, зеленые и диатомовые) с климатическими факторами (осадки, температура воздуха). Тогда как в отношении цианопрокариот установлена умеренная (-0.51) и сильная (0.71) связи. В условиях устойчивой теплой и сухой погоды в августе 2022 г. отмечено «цветение» воды потенциально токсичными видами цианопрокариот *Microcystis*. Увеличение доли безгетероцистных синезеленых водорослей и летний пик их развития указывает на эвтрофные условия водоема в этот период. Кроме того, активному развитию именно рода *Microcystis*, вероятно, способствуют гидрологические и гидрохимические особенности водоема, морфолого-физиологические особенности рода (плавучесть, наличие слизистых колоний и газовых вакуолей, отсутствие механизма азотфиксации и способность использовать органические источники азота) (Поляк и др., 2022). Возможно, что в озере в условиях теплой и сухой погоды активное развитие *Microcystis* поддерживается аллелопатическим влиянием других видов фитопланктона, в частности динофитовых водорослей. Согласно обзору Е.М. Gross (2003) развитие *Microcystis* и динофитовых водорослей часто встречаются в одном озере. В августе 2022 г. в составе фитопланктона оз. Комсомольское доминировали *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae* (45% от общей биомассы) и *Peridiniopsis quadridens* (30%).

Межгодовая изменчивость отмечается также по составу морфологических и функциональных групп. Сообщества 2020 и 2022 гг. объединились в один кластер (75–80%), с развитием мелко-размерных видов (отношение биомассы и численности варьировало в пределах 0.09–0.17), мелких жгутиковых видов с кремнистыми структурами экзоскелета (II) и одноклеточных жгутиковых видов (V), реагирующие на дефицит углерода (E) и чувствительные к перемешиванию (Lo). Обычно уменьшение размерности клеток фитопланктона происходит с повышением уровня трофии вод (Корнева и др., 2021). В 2021 и 2023 гг. сообщество характеризовалось большим разнообразием морфологических и функциональных групп, с преимущественным развитием крупноразмерных видов (отношение биомассы и численности составило 0.25–0.27).

Согласно кластеризации фитопланктона по видовому разнообразию, 2021–2023 гг. объединились в один кластер (80–90%) и достоверно отличаются от 2020 года. Изменчивость фитопланктона отмечается по общей численности и биомассе. В межгодовой динамике наблюдается тенденция снижения численности и биомассы.

Таким образом, проведенные дноочиститель-

ные мероприятия, направленные на экореабилитацию оз. Комсомольское, явились триггерным фактором для развития фитопланктона, влияющим на ход его сукцессионных процессов. В начале аллогенной сукцессии возрастали общая численность, биомасса, индекс плотности фитопланктона. Сообщество характеризовалось низкими значениями видового разнообразия и выравненности. Сукцессия находилась в гетеротрофной фазе, на стадии эвтрофии. В последующие годы сукцессия была направлена в сторону снижения количественных показателей, увеличения размерной структуры и показателей индексов Шеннона и Пиелу, обилия диатомовых и зеленых водорослей. Гетеротрофная фаза сменялась на автотрофную. Отмечен переход эвтрофной стадии в мезотрофную, олиготрофную; режима «мутной воды» в «прозрачную воду». Динамика значений NDVI характеризует сложившуюся экосистему автотрофного компонента водоема к четвертому году исследований как устойчивую. Несомненна роль макрофитов с харофитами в регуляции сукцессионных процессов фитопланктона.

Заключение

В результате исследований 2020–2023 гг. в составе фитопланктона оз. Комсомольское обнаружен 81 вид из 7 систематических отделов, в том числе Cyanoprokaryota (15% от общего числа видов), Chrysophyta (8%), Bacillariophyta (39%), Chlorophyta (30%), Dinophyta (4%), Cryptophyta и Euglenophyta (по 2%). Выявлены закономерности изменения структурных характеристик фитопланктона озера после проведения дноочистительных работ. Состав и структура фитопланктона не была постоянной и варьировала по годам. Начальным этапом аллогенной сукцессии фитопланктона была гетеротрофная фаза, переходящая в автотрофную. Ценогенез фитопланктона в первый год был направлен на увеличение доли миксотрофных фитофлагеллят (золотистых и динофитовых водорослей), общей численности и биомассы, снижение видового разнообразия и выравненности. В последующие годы нарастало обилие автотрофной составляющей (диатомовых и зеленых), вместе с тем наблюдалось снижение общих количественных показателей сообщества, увеличение размерности структуры, значений индексов видового разнообразия и выравненности.

По уровню биомассы фитопланктона эвтрофная стадия сукцессии переходила в олиготрофную. Эвтрофная стадия определялась *Dinobryon divergens*, видами рода *Chromulina*, *Parvodinium umbonatum* и *Peridiniopsis quadridens*. При переходе в мезотрофное состояние основу планктонных

комплексов создавали *Crucigenia rectangularis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Ulnaria ulna*, *Fragilaria crotonensis*, *Handmannia comta*, *D. divergens* и виды родов *Kephyrion* и *Pseudokephyrion*; олиготрофное – *H. comta*, видами рода *Cryptomonas*, *A. aciculiferum* и *Monoraphidium circinale*.

Ход межгодовой сукцессии фитопланктона определялся последовательной сменой функциональных групп E, Lo, X3 (2020) → B, D, J, P, Lo (2021) → D, E, Lo (2022) → B, J, Lo, X1 (2023) и морфологических групп II, V → IV, V, VI → II, V, VI → IV, V, VI. Сообщество фитопланктона было сформировано как видами, реагирующими на дефицит углерода и предпочитающих мелководные эвтрофные водоемы, так и видами, толерантными к световому лимитированию, перемешиванию и стратификации.

К моменту завершения исследований комплексная оценка динамики количественных показателей сообщества, гидрохимических показателей, нормализованного вегетационного индекса характеризует сложившуюся экосистему водоема как устойчивую.

Список литературы

1. Абрамова К.И., Токинова Р.П., Водунов Н.Р., Шагидуллин Р.Р. Анализ корреляционной связи между развитием фитопланктона и кислородным режимом устьевой области реки // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. №5. С. 20–31. doi:10.17076/eco1391.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
3. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
4. Герасимов Ю.Л., Сеницкий А.В. Ракообразные в городском пруду после его чистки // Биоэкологическое краеведение: мировые, российские и региональные проблемы / Материалы IV Международной научно-практической конференции. Самара. 2015. С. 118–123.
5. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Валиев В.С., Хасанов Р.Р., Маланин В.В., Марасов А.А., Шамаев Д.Е., Паймикина Э.Е. Характеристика донных отложений озера Комсомольское // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Материалы II Международной конференции. Казань. 2019. С. 93–98.
6. Корнева Л.Г. Фитопланктон Рыбинского водохранилища: состав, особенности распределения, последствия эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб.: Гидрометеоздат. 1993. С. 50–113.
7. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромск. печат. Дом, 2015. 284 с.
8. Корнева Л.Г., Митропольская И.В., Макаренкова Н.Н., Цветков А.И. Структура и динамика фитопланктона больших мелководных зарастающих озер (Воже и Лача, Вологодская и Архангельская области, Россия) // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2021. №94. С. 17–29. doi: 10.47021/0320-3557-2021-17-29.
9. Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Динамика морфофункциональных групп фитопланктона Рыбинского водо-

хранилища и оценка качества его вод по индексу сообществ // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, №1. С. 52–60. <https://doi.org/10.31857/S032105962101020X>.

10. Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Золотистые водоросли (Chrysophyta) в планктоне Волжских водохранилищ: таксономическая структура, динамика разнообразия и обилия // Биология внутренних вод. 2017. №2. С. 50–58. doi:10.7868/S0320965217020073.

11. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. М.: Наука, 1975. 240 с.

12. Охупкин А.Г., Воденеева Е.Л., Шарагина Е.М., Кулицин П.В. Состав и структура фитопланктона оз. Светлояр (Россия) // Биология внутренних вод. 2022. №5. С. 480–492. doi: 10.31857/S0320965222050199.

13. Павлова О.А. Афанасьева А.Л. Игнатъева Н.В. Биоиндикация по фитопланктону состояния водоемов Санкт-Петербурга после дноочистительных мероприятий // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем / Сборник тезисов докладов II Международной конференции. СПб., 2011. С. 121.

14. Поддубный С.А., Чемерис Е.В., Кутузов А.В., Цветков А.И., Бобров А.А. Динамика высшей водной растительности защищенного мелководья в связи с уровнем воды в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2022. №2. С. 136–146. doi: 10.31857/S0320965222020085.

15. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И., Поляк М.С. Цианобактерии и их метаболиты. СПб: Нестор-История. 2022. 328 с.

16. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. №552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

17. Рубцова С.И., Алемов С.В. Влияние дноочистительных работ на экологическое состояние портовых акваторий // Морской экологический журнал. 2011. №2. С. 81–87.

18. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

19. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.

20. Токинова Р.П., Любарский Д.С., Буторова Л.Е. Особенности населения макрофитов и фитотфильной фауны в озере Комсомольское (г. Казань) в зимний период // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Материалы II Международной конференции. Казань, 2019. С. 341–345.

21. Токинова Р.П., Сергеев А.С. О причинах массовой гибели рыбы в озере Комсомольское (г. Казань) // Сборник трудов X специализированной выставки и конгресса «Чистая вода. Казань». Казань, 2019. С. 119–122.

22. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти: Кассандра, 2011. 255 с.

23. Экология города Казани. Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2005. 576 с.

24. Cabrita M.T. Phytoplankton community indicators of changes associated with dredging in the Tagus estuary (Portugal) // Environmental pollution. 2014. Vol. 191. P. 17–24. doi: 10.1016/j.envpol.2014.04.001.

25. Caetano M., Madureira M.J., Vale C. Metal remobilization during resuspension of anoxic contaminated sediment: short-term laboratory study // Water, air, and soil pollution. 2003. Vol. 143. P. 23–40.

26. Cao X., Song C., Li Q., Zhou Y. Dredging effects on P

status and phytoplankton density and composition during winter and spring in Lake Taihu, China // Hydrobiologia. 2007. Vol. 581. P. 287–295.

27. Gao G., Liu H., Gu Y., Jia X. Normalized difference phytoplankton index (NDPI) and spatio-temporal cloud filtering for multitemporal cyanobacteria pollution analysis on Erie Lake in 2014 // 8th International workshop on the analysis of multitemporal remote sensing images. 2015. P. 1–4.

28. Gross E.M. Allelopathy of aquatic autotrophs // Critical reviews in plant science. 2003. Vol. 22. P. 313–339.

29. Jing L., Bai S., Li Y., Peng Y., Wu C., Liu J., Liu G., Xie Z., Yu G. Dredging project caused short-term positive effects on lake ecosystems health: A five-year follow-up study at the integrated lake ecosystem level // Science of the total environment. 2019. Vol. 686. P. 753–763. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.133.

30. Kruk C., Segura A.M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups // Hydrobiologia. 2012. Vol. 698. P. 191–202. doi: 10.1007/s10750-012-1072-6.

31. Newell R.C., Seiderer L.J., Hitchcock D.R. The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed // Oceanography and marine biology: an annual review. 1998. Vol. 36. P. 127–178.

32. Padisak J., Crossetti L., Nasselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // Hydrobiologia. 2009. Vol. 621. P. 1–19.

33. Paerl H.W., Valdes L.M., Joyner A.R., Winkelmann V. Phytoplankton indicators of ecological change in the eutrophying Pamlico Sound system. North Carolina // Ecological applications. Vol. 17. P. 88–101.

34. Pan K., Wang W.X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China // Science of the total environment. 2012. Vol. 421–422. P. 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.03.013>.

35. Pithakpol S. The impact of maintenance dredging on water quality and phytoplankton standing stock in Kwan Phayao Lake, Thailand // Naresuan university journal: science and technology. 2007. Vol. 15, №1. P. 1–8.

36. Rainbow P.S. Biomonitoring of trace metals in estuarine and marine environments // Australasian journal of ecotoxicology. 2006. Vol. 12. P. 107–122.

37. Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium. NASA. 1974. P. 309.

38. Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // Journal of plankton research. 2002. Vol. 24, iss. 5. P. 417–428.

39. Sládeček V. System of water quality from the biological point of view // Archiv fur Hydrobiologie. Beiheft Ergebnisse der Limnologie. 1973. Bd. 7. 218 p.

40. Tian Y.Q., Yu Q., Zimmerman M.J., Flint S., Waldron M.C. Differentiating aquatic plant communities in a eutrophic river using hyperspectral and multispectral remote sensing // Freshwater biology. 2010. Vol. 55, iss. 8. P. 1658–1673. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02400.x>.

41. Zhao D. Application of NDVI to detecting algal bloom in the Bohai Sea of China from AVHRR // Ocean remote sensing and applications. SPIE. 2003. Vol. 4892. P. 241–246.

References

1. Abramova K.I., Tokinova R.P., Vodunon N.R., SHagidullin R.R. Analiz korrelyacionnoj svyazi mezhdru razvitiem fitoplanktona i kislorodnym rezhimom ust'evoy oblasti reki [Analy-

- sis of the correlation between the development of phytoplankton and the oxygen regime of the estuary area of the river] // *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 5. P. 20–31. doi: 10.17076/eco1391.
2. Alekin O.A. *Osnovy gidrohimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p.
 3. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Bioraznoobrazie vodoroslej-indikatorov okruzhayushchej sredy* [Biodiversity of algae-indicators of the environment]. Tel'-Aviv: Pilies Studio, 2006. 498 p.
 4. Gerasimov Yu.L., Sinickij A.V. *Rakoobraznye v gorodskom prudu posle ego chistki* [Crustaceans in a city pond after its cleaning] // *Bioekologicheskoe kraevedenie: mirovye, rossijskie i regional'nye problem* [Bioecological local history: world, russian and regional problems]. Samara, 2015. P. 118–123.
 5. Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Valiev V.S., Hasanov R.R., Malanin V.V., Marasov A.A., Shamaev D.E., Pajmikina E.E. *Harakteristika donnyh otlozhenij ozera Komsomol'skoe* [Characteristics of bottom sediments of Komsomolskoye Lake] // *Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya* [Lakes of Eurasia: problems and solutions]. Kazan', 2019. P. 93–98.
 6. Korneva L.G. *Fitoplankton Rybinskogo vodohranilishcha: sostav, osobennosti raspredeleniya, posledstviya evtrofirovaniya* [Phytoplankton of the Rybinsk reservoir: composition, distribution features, consequences of eutrophication] // *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Rybinskogo vodohranilishcha* [The current state of the ecosystem of the Rybinsk reservoir]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. P. 50–113.
 7. Korneva L.G. *Fitoplankton vodohranilishch bassejna Volgi* [Phytoplankton of reservoirs in the Volga basin]. Kostroma, 2015. 284 p.
 8. Korneva L.G., Mitropol'skaya I.V., Makarenkova N.N., Cvetkov A.I. *Struktura i dinamika fitoplanktona bol'shikh melkovodnyh zarastayushchih ozer (Vozhe i Lacha, Vologodskaya i Arhangel'skaya oblasti, Rossiya)* [Structure and dynamics of phytoplankton of large shallow overgrown lakes (Vozhe and Lacha, Vologda and Arkhangelsk regions, Russia)] // *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I.D. Papanina RAN* [Proceedings of the I.D. Papanin institute of biology of inland waters of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 94. P. 17–29. doi: 10.47021/0320-3557-2021-17-29.
 9. Korneva L.G., Solov'eva V.V. *Dinamika morfofunkcional'nykh grupp fitoplanktona Rybinskogo vodohranilishcha i ocenka kachestva ego vod po indeksu soobshchestv* [Dynamics of morphofunctional groups of phytoplankton of the Rybinsk reservoir and assessment of the quality of its waters according to the community index] // *Vodnye resursy* [Water resources]. 2021. Vol. 48, No 1. P. 52–60. doi: 10.31857/S032105962101020X.
 10. Korneva L.G., Solov'eva V.V. *Zolotistye vodorosli (Chrysophyta) v planktone Volzhskikh vodohranilishch: taksonomicheskaya struktura, dinamika raznoobraziya i obiliya* [Golden algae (Chrysophyta) in the plankton of the Volga reservoirs: taxonomic structure, dynamics of diversity and abundance] // *Biologiya vnutrennih vod* [Biology of inland waters]. 2017. No 2. P. 50–58. doi: 10.7868/S0320965217020073.
 11. *Metodika izucheniya biogeocенозов vnutrennih vo-domov* [Methods of studying biogeocenoses of inland reservoirs] / Ed. F.D. Morduhaj-Boltovskoi. Moscow: Nauka, 1975. 240 p.
 12. Ohapkin A.G., Vodeneeva E.L., SHaragina E.M., Kulizin P.V. *Sostav i struktura fitoplanktona oz. Svetloyar (Rossiya)* [Composition and structure of phytoplankton of the lake. Svetloyar (Russia)] // *Biologiya vnutrennih vod* [Biology of inland waters]. 2022. No 5. P. 480–492. doi: 10.31857/S0320965222050199.
 13. Pavlova O.A., Afanas'eva A.L., Ignat'eva N.V. *Bioindikaciya po fitoplanktonu sostoyaniya vodoemov Sankt-Peterburga posle dnoochistitel'nykh meropriyatij* [Bioindication on phytoplankton of the state of St. Petersburg reservoirs after bottom cleaning measures] // *Bioindikaciya v monitoringe presnovodnykh ekosistem* [Bioindication in monitoring freshwater ecosystems]. Saint-Petersburg, 2011. P. 121.
 14. Poddubnyj S.A., Chemeris E.V., Kutuzov A.V., Cvetkov A.I., Bobrov A.A. *Dinamika vysshej vodnoj rastitel'nosti zashchishchennogo melkovod'ya v svyazi s urovnem vody v Volzhskom plese Rybinskogo vodohranilishcha* [Dynamics of the highest aquatic vegetation of the protected shallow water in connection with the water level in the Volga reach of the Rybinsk reservoir] // *Biologiya vnutrennih vod* [Biology of inland waters]. 2022. No 2. P. 136–146. doi: 10.31857/S0320965222020085.
 15. Polyak YU.M., Suharevich V.I., Polyak M.S. *Cianobakterii i ih metabolity* [Cyanobacteria and their metabolites]. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya, 2022. 328 p.
 16. *Prikaz Ministerstva sel'skogo hozyajstva Rossijskoj federacii ot 13.12.2016 g. No 552 «Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednykh veshchestv v vodah vodnykh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya»* [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated December 13, 2016 «On Approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance»]. Moscow, 2016. 153 p.
 17. Rubcova S.I., Alyomov S.V. *Vliyanie dnoochistitel'nykh rabot na ekologicheskoe sostoyanie portovykh akvatorij* [The impact of dredging on the environmental condition of port waters] // *Morskoy ekologicheskij zhurnal* [Marine environmental journal]. 2011. No 2. P. 81–87.
 18. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans].
 19. Trifonova I.S. *Ekologiya i sukcessiya ozernogo fitoplanktona* [Ecology and succession of lake phytoplankton]. Leningrad: Nauka, 1990. 184 p.
 20. Tokinova R.P., Lyubarskij D.S., Butorova L.E. *Osobennosti naseleniya makrofitov i fitofil'noj fauny v ozere Komsomol'skoe (g. Kazan') v zimnij period* [Features of the population of macrophytes and phytophilic fauna in Lake Komsomolskoye (Kazan) in winter] // *Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya* [Lakes of Eurasia: problems and ways to solve them]. Kazan', 2019. P. 341–345.
 21. Tokinova R.P., Sergeev A.S. *O prichinah massovoj gibeli ryby v ozere Komsomol'skoe (g. Kazan')* [About the causes of mass death of fish in Lake Komsomolskoye (Kazan)] // *Sbornik trudov X Specializirovannoj vystavki i Kongressa «Chistaya voda. Kazan'»* [Proceedings of the X specialized exhibition and congress «Clean water. Kazan'»]. Kazan', 2019. P. 119–122.
 22. SHitikov V.K., Zinchenko T.D., Rozenberg G.S. *Makroekologiya rechnykh soobshchestv: koncepcii, metody, modeli* [Macroecology of river communities: concepts, methods, models]. Tol'yatti: Kassandra, 2011. 255 p.
 23. *Ekologiya goroda Kazani* [Ecology of the city of Kazan]. Kazan': «Fen» AN RT. 2005. 576 p.
 24. Cabrita M.T. *Phytoplankton community indicators of changes associated with dredging in the Tagus estuary (Portugal)* // *Environmental pollution*. 2014. Vol. 191. P. 17–24. doi: 10.1016/j.envpol.2014.04.001.
 25. Caetano M., Madureira M.J., Vale C. *Metal remobi-*

lization during resuspension of anoxic contaminated sediment: short-term laboratory study // *Water, air, and soil pollution*. 2003. Vol. 143. P. 23–40.

26. Cao X., Song C., Li Q., Zhou Y. Dredging effects on P status and phytoplankton density and composition during winter and spring in Lake Taihu, China // *Hydrobiologia*. 2007. Vol. 581. P. 287–295.

27. Gao G., Liu H., Gu Y., Jia X. Normalized difference phytoplankton index (NDPI) and spatio-temporal cloud filtering for multitemporal cyanobacteria pollution analysis on Erie Lake in 2014 // 8th International workshop on the analysis of multi-temporal remote sensing images. 2015. P. 1–4.

28. Gross E.M. Allelopathy of aquatic autotrophs // *Critical reviews in plant science*. 2003. Vol. 22. P. 313–339.

29. Jing L., Bai S., Li Y., Peng Y., Wu C., Liu J., Liu G., Xie Z., Yu G. Dredging project caused short-term positive effects on lake ecosystems health: A five-year follow-up study at the integrated lake ecosystem level // *Science of the total environment*. 2019. Vol. 686. P. 753–763. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.133.

30. Kruk C., Segura A.M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups // *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 698. P. 191–202. doi: 10.1007/s10750-012-1072-6.

31. Newell R.C., Seiderer L.J., Hitchcock D.R. The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed // *Oceanography and marine biology: an annual review*. 1998. Vol. 36. P. 127–178.

32. Padišak J., Crossetti L., Nasselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 621. P. 1–19.

33. Paerl H.W., Valdes L.M., Joyner A.R., Winkelmann V. Phytoplankton indicators of ecological change in the eutrophying Pamlico Sound system. North Carolina // *Ecological applications*. Vol. 17. P. 88–101.

34. Pan K., Wang W.X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China // *Science of the total environment*. 2012. Vol. 421–422. P. 3–16. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.03.013.

35. Pithakpol S. The impact of maintenance dredging on water quality and phytoplankton standing stock in Kwan Phayao lake, Thailand // *Naresuan university journal: science and technology*. 2007. Vol. 15, №1. P. 1–8.

36. Rainbow P.S. Biomonitoring of trace metals in estuarine and marine environments // *Australasian journal of ecotoxicology*. 2006. Vol. 12. P. 107–122.

37. Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium. NASA. 1974. P. 309.

38. Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // *Journal of plankton research*. 2002. Vol. 24, iss. 5. P. 417–428.

39. Sládeček V. System of water quality from the biological point of view // *Archiv für Hydrobiologie. Beiheft Ergebnisse der Limnologie*. 1973. Bd. 7. 218 p.

40. Tian Y.Q., Yu Q., Zimmerman M.J., Flint S., Waldron M.C. Differentiating aquatic plant communities in a eutrophic river using hyperspectral and multispectral remote sensing // *Freshwater biology*. 2010. Vol. 55, iss. 8. P. 1658–1673. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02400.x.

41. Zhao D. Application of NDVI to detecting algal bloom in the Bohai Sea of China from AVHRR // *Ocean remote sensing and applications*. SPIE. 2003. Vol. 4892. P. 241–246.

Abramova K.I., Tokinova R.P., Ivanov D.V. **Succession of phytoplankton in Komsomolskoye Lake (Kazan) after the dredging works.**

Based on long-term observations (2020–2023), changes in the composition and structure in phytoplankton of Lake Komsomolskoye (Kazan, Republic of Tatarstan) after the environmental rehabilitation measures were studied. Those measures had taken place in 2019, and had included bottom cleaning. The initial stage of the interannual succession of phytoplankton was the heterotrophic phase with the development of phytoflagellates (Chrysophyta and Dinophyta), passing into the autotrophic phase (Chlorophyta and Bacillariophyta). We present the course of interannual succession of phytoplankton in terms of trophic level, change of functional and morphological groups. We have analyzed the relationships of community groups quantitative indicators with physical indicators of water (transparency, color) and climatic factors (air temperature, precipitation). The assessment of community quantitative indicators dynamics, the hydrochemical indicators, and the normalized vegetation index characterized the ecosystem of the reservoir as stable by the final year of research.

Keywords: phytoplankton; succession; Komsomolskoye Lake; bottom cleaning.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 08.12.23

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 16.01.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 30.01.2024

Сведения об авторах

Абрамова Ксения Ивановна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Токинова Римма Петровна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, доктор географических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Information about the authors

Ksenia I. Abramova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Rimma P. Tokinova, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Dmitrii V. Ivanov, D.Sci. in Geography, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: water-rf@mail.ru.

