

## Влияние климатических изменений на структуру летнего фитопланктона озера лесной зоны (Раифское, Волжско-Камский заповедник)

О. В. ПАЛАГУШКИНА<sup>1</sup>, Е. Н. УНКОВСКАЯ<sup>2</sup>, Л. Б. НАЗАРОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Институт управления, экономики и финансов  
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18  
E-mail: opalagushkina@mail.ru

<sup>2</sup>Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник  
422537, Республика Татарстан, Зеленодольский район, пос. Садовый, ул. Вехова, 1  
E-mail: vkz@mail.ru

Статья поступила 29.06.2023

После доработки 25.07.2023

Принята к печати 28.07.2023

### АННОТАЦИЯ

Изменение климата, вызывающее значительные структурные трансформации экосистем, становится одной из наиболее острых экологических проблем современности. Выделить влияние климата на природные сообщества позволяют мониторинговые наблюдения на заповедных территориях, где антропогенные воздействия минимальны. Нами изучено изменение структуры летнего фитопланктона оз. Раифское (Волжско-Камский заповедник) за более чем двадцатилетний период наблюдений и связь этих изменений с факторами среды. Проведенное исследование показало увеличение доли динофитовых водорослей в общей биомассе летнего фитопланктона озера лесной зоны, что больше свойственно структуре сообществ озер лесостепной зоны. Показано ведущее значение климата, в частности температуры воздуха самого теплого месяца (июля), в изменении структуры фитопланктона. Влияние влажности климата (осадков) на сообщество фитопланктона выявлено не было. Наши данные свидетельствуют о том, что современные изменения климата приводят к перестройкам фитопланктональных сообществ, при которых структура биомассы летнего фитопланктона озера лесной зоны Среднего Поволжья может приобретать особенности структуры сообществ озер лесостепной зоны.

**Ключевые слова:** мониторинг, фитопланктон, биомасса, изменение климата, оз. Раифское.

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, в значительной мере связанное с усилением антропогенного воздействия, становится одной из наиболее острых экологических проблем современности [Kumke et al., 2007; Wetterich et al., 2018]. Повышение температуры является одной из важней-

ших причин деградации окружающей среды и безопасности водных ресурсов [Palagushkina et al., 2012; Engels et al., 2020; Climate..., 2022]. Фитопланктон, являясь продуцентом, за счет которого существуют гетеротрофные водные организмы, служит ведущим компонентом обеспечения стабильности функцио-

нирования водных экосистем [Palagushkina et al., 2017; Biskaborn et al., 2019]. Многолетние ряды наблюдений позволяют создать ценные базы данных об изменении водных сообществ под воздействием природных и антропогенных факторов [Палагушкина и др., 2002; Трифонова и др., 2008; Шашуловская и др., 2021; Бондаренко, 2022]. Мониторинговые исследования, проводимые на особо охраняемых природных территориях, позволяют выделить влияние на экосистемы именно природных факторов, в частности климатических, поскольку в условиях стабильной биогенной и антропогенной нагрузки, которая складывается на заповедных территориях, определяющим уровень развития водорослей параметром может становиться температура [Трифонова и др., 2008]. Несмотря на значимость проблемы, длительных рядов наблюдений, позволяющих выявить влияние климатических изменений на сукцессию сообществ фитопланктона, в пресноводных антропогенно ненарушенных экосистемах недостаточно [Subetto et al., 2017].

В связи с этим основной целью нашего исследования стало выявление изменений структуры летнего фитопланкtonного сообщества оз. Раифское (Волжско-Камский заповедник) за период с 2000 по 2021 г. под воздействием факторов окружающей среды. Подобное исследование проведено впервые для карстовых озер Среднего Поволжья. Для достижения цели решались следующие задачи: изучить изменения структуры биомассы летнего фитопланктона оз. Раифское; проанализировать влияние физико-химических параметров воды на структуру биомассы летнего фитопланктона; выявить влияние основных климатических показателей (температуры, осадков) на структуру биомассы летнего фитопланктона; сопоставить новые данные с результатами более ранних наблюдений [Палагушкина, 2004].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Волжско-Камский государственный заповедник образован 13 апреля 1960 г. на левобережных террасах Волги на территории Зеленодольского района Республики Татарстан Российской Федерации. Целью создания была охрана сохранившихся ненарушенных лесных

и лесостепных экосистем Среднего Поволжья [Постановление..., 1960]. Более 90 % площади заповедника покрыто лесами (сосны, дубы, липы, березы, осины, ольшаники). Заповедник состоит из двух участков – Саралинского и Раифского. Раифский участок заповедника имеет равнинный рельеф с сетью оврагов и болот. Климат умеренно континентальный с резкими колебаниями температур и выпадением осадков. Снежный покров умеренный, достигает своей максимальной толщины в феврале и марте – 38 см. Средняя температура летом +17...+20 °C, зимой – –9...–12 °C [Палагушкина, 2004].

Озеро Раифское – самое большое по площади и объему на участке Волжско-Камского заповедника. По ландшафтно-географической зональности озеро находится в лесной зоне провинции Вятско-Камской возвышенности Среднего Поволжья [Озера..., 1976] (рис. 1).

Этот проточный карстовый водоем в своем питании и режиме связан с р. Сумкой и ее деятельностью [Унковская и др., 2010; Унковская, Тарасов, 2016]. Озеро вытянуто с севера на юг, со всех сторон окружено лесом. По результатам гидрологической съемки заповедника длина озера составляет 1296 м при максимальной ширине 320 м, максимальная глубина 20,3 м, площадь озера 31,99 га, объем воды 2077,63 тыс. м<sup>3</sup> [Унковская и др., 2016].

Гидрохимические и гидробиологические исследования оз. Раифское проводятся с 1996 г. с использованием единой методики. В данной статье анализируются результаты, полученные при исследовании летнего фитопланктона озера в период с 2000 по 2021 г., за исключением 2010 и 2011 гг., когда исследования не проводились по причинам недостаточного финансирования.

Количественные усредненные пробы фитопланктона отбирались в июле (15 проб из 19 исследованных), реже – в конце июня, на постоянной глубоководной станции (см. рис. 1) батометром Молчанова. В соответствии с методикой, вода в равных аликвотах (0,5 л) бралась, начиная с поверхности, затем через каждые 2 м до нижней границы металимниона и в придонном слое на глубине 18 м [Методика..., 1975]. Пробы фиксировались 40%-м формалином, концентрировались отстойным способом, просчитывались в камере Нажотта объемом 0,02 мл. Биомассу определяли об-



Рис. 1. Карта расположения оз. Раифское: а – в пределах Евразии, б – в пределах Среднего Поволжья, в – оз. Раифское, звездочкой обозначено место отбора проб

щепринятым способом по объемам массовых видов водорослей [Методика..., 1975]. При определении видового состава использовались отечественные и зарубежные определьители [Голлербах, Полянский, 1951; Забелина и др., 1951; Голлербах и др., 1953; Киселев, 1954; Матвиенко, 1954; Попова, 1955; Дедусенко-Щеголева, Голлербах, 1962; Паламарь-Мордвинцева, 1982; Krammer, Lange-Bestalot, 1986, 1988, 1991а, б].

Кроме того, параллельно с гидробиологическими исследованиями проводились физико-химические исследования воды. Пробы отбирались в поверхностном и придонном гори-

зонтах и в период 2001–2002 гг. анализировались в Центральной специализированной инспекции аналитического контроля Министерства природных ресурсов Республики Татарстан, с 2003 по 2021 г. – в Лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды Института проблем экологии и недропользования АН РТ. В воде определялись 11 основных показателей: общая минерализация, жесткость, содержание растворенного в воде кислорода, pH, состав основных и биогенных ионов (аммонийного, нитритного и нитратного азота и фосфатов), величины биохимического и химического

потребления кислорода и содержание общего железа. Анализы проводились по аттестованным методикам. Непосредственно на водоеме при отборе гидрохимических проб фиксировали прозрачность (по диску Секки), цвет (по шкале цветности ГОСТ 4266-79), температуру через каждые 2 м (термометром на батометре Молчанова). Сравнение химических показателей проводилось в соответствии с предельно допустимыми концентрациями для водоемов рыбохозяйственного использования [Перечень..., 1999]. Тип воды определялся по классификации Алекина [Алекин, 1970].

Метеорологические данные о среднемесячных показателях температуры воздуха и осадков в районе исследования за период исследования взяты с открытого Справочно-информационного портала "Погода и климат" [<http://www.pogodaiklimat.ru/history/27595.htm>].

Расчет коэффициента вариации осуществлялся по формуле:

$$C_V = (\sigma/k) \cdot 100,$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение случайной величины;  $k$  – ожидаемое (среднее) значение случайной величины [[https://wikipedia.org/w/index.php?title=Variation\\_coefficient&oldid=99999999](https://wikipedia.org/w/index.php?title=Variation_coefficient&oldid=99999999)]. При этом если коэффициент вариации меньше 10 %, то степень рассеивания данных считается незначительной; если от 10 до 20 % – средней; больше 20 % и меньше или равно 33 % – значительной. Если значение коэффициента вариации не превышает 33 %, то совокупность считается однородной, а если больше 33 %, то неоднородной.

Для определения влияния параметров среды на биомассу фитопланктона был применен комплекс методов многомерного анализа, использованных ранее для аналогичных целей в наших публикациях [Palagushkina et al., 2012; Nazarova et al., 2017]. Метод непрямой ординации (МНО), анализ соответствия с удаленным трендом, был использован для расчета длины общего экологического градиента, что необходимо для оценки зависимости (линейной или одновершинной), существующей между экологическими факторами среды и распределением биомассы основных отделов фитопланктона [Birks, 1995]. МНО (данные преобразованы извлечением квадратного корня) выявил, что градиентная длина оси 1 составляет 2,05 единиц стандартного откло-

нения, что говорит о необходимости применения линейного метода ординации – анализа избыточности (АИ) [ter Braak, Šmilauer, 2002], который используется в тех случаях, когда анализируется недостаточно длинный экологический градиент, в рамках которого таксоны реагируют на изменение среды линейно [ter Braak, Verdonschot, 1995]. Для достижения нормальности распределения выборки показатели были трансформированы логарифмированием. Ординационный анализ выполнен в программе CANOCO 4.5 [ter Braak, Šmilauer, 2002].

Для проверки мультиколлинеарности комплекса экологических переменных проведен анализ с использованием коэффициентов возрастания дисперсии (КВД). Экологические параметры со значениями КВД выше 20 удалялись по одному, начиная с того, который имел самое высокое значение, и до тех пор, пока значения КВД всех оставшихся факторов не были ниже 20. Минимальное количество экологических параметров, достоверно объясняющих вариации данных фитопланктона, было затем оценено методом отбора вперед. Статистическая значимость каждого фактора была оценена тестом Монте-Карло с 999 неограниченными перестановками.

Стратиграфические диаграммы, показывающие последовательное изменение параметров среды (биомассы разных отделов водорослей в летнем фитопланктоне, физико-химических показателей воды в оз. Раифское, температуры воздуха и количества выпадающих осадков в районе озера) относительно временной шкалы, отображающей период проводимого исследования с 2000 по 2021 г., построены в программе C2 [Juggins, 2007].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Прозрачность воды озера в период исследования составляла в среднем 1,3 м. Цвет воды был зеленовато-желтый. Температурный режим характерен для стратифицированных озер. По многолетним исследованиям тип воды оз. Раифское относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе со средней минерализацией. Вариации гидрохимических показателей за период исследования представлены на рис. 2 и 3.

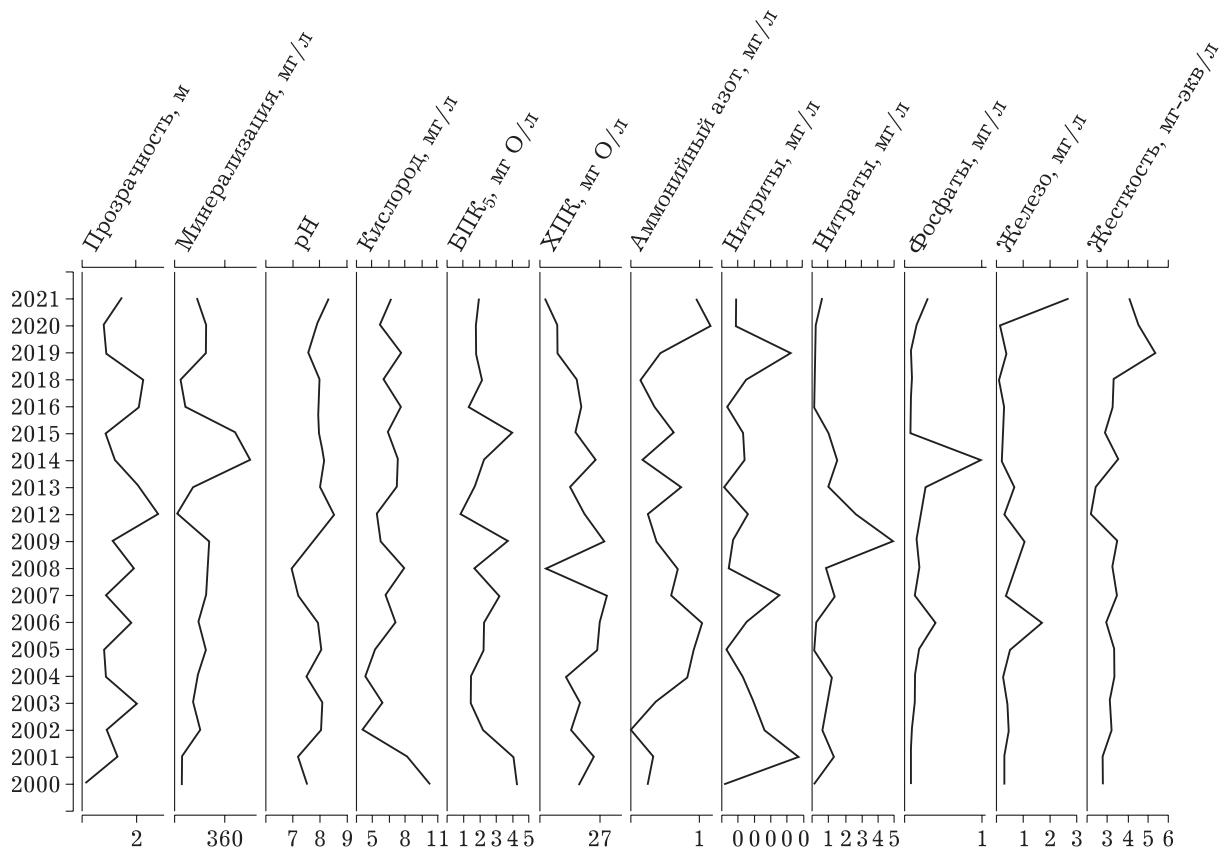


Рис. 2. Динамика усредненных по столбу воды физико-химических показателей воды в оз. Раифское с 2000 по 2021 г.

По общей жесткости вода озера относится к категории “мягкая”. Активная реакция среды слабощелочная, в среднем 7,1–8,5. У поверхности озера в период массового развития фитопланктона значения pH увеличиваются до 9,5 [Унковская и др., 2016]. Содержание растворенного кислорода соответствовало нормальному насыщению у поверхности (62,9–65,1 %) и было минимальным у дна (15,5–46,0 %). Содержание аммонийного азота изменялось в пределах 0,95–2,13 мг/дм<sup>3</sup> (1,9–4,2 ПДК), фосфатов – 0,86–1,37 мг/дм<sup>3</sup> (4,3 ПДК), содержание нитратов и нитритов соответствовало норме (см. рис. 2, 3). Максимальное превышение отмечалось в 2011 г., на следующий год после резкого изменения гидрологического режима, вызванного аномальной жарой 2010 г. [Unkovskaya et al., 2020].

Обобщение данных по физико-химическим исследованиям за указанный период показало, что значимых увеличений концентраций основных биогенных элементов азотной

и фосфорной групп не отмечалось (см. рис. 3). Тенденций в изменении химического состава воды не наблюдается.

Анализ динамики климатических показателей, среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха и количества осадков, выпадающих в среднем за месяц и за год, показал, что наибольшие изменения произошли со среднемесячными температурами мая, июня, июля и среднегодовой температурой. Для всех этих показателей отмечена тенденция к увеличению значений (рис. 4).

Так, начиная с 2003 г. средняя за май температура стабильно выше +14 °C, среднеиюньская температура стабильно выше +18 °C, а средняя за июль температура стремится к +22 °C. Среднегодовая температура за период исследований стала выше практически на один градус. Анализ данных по количеству осадков, выпадающих за исследуемый период, не выявил значимых изменений ни по среднемесячным, ни по среднегодовым показателям (рис. 5).

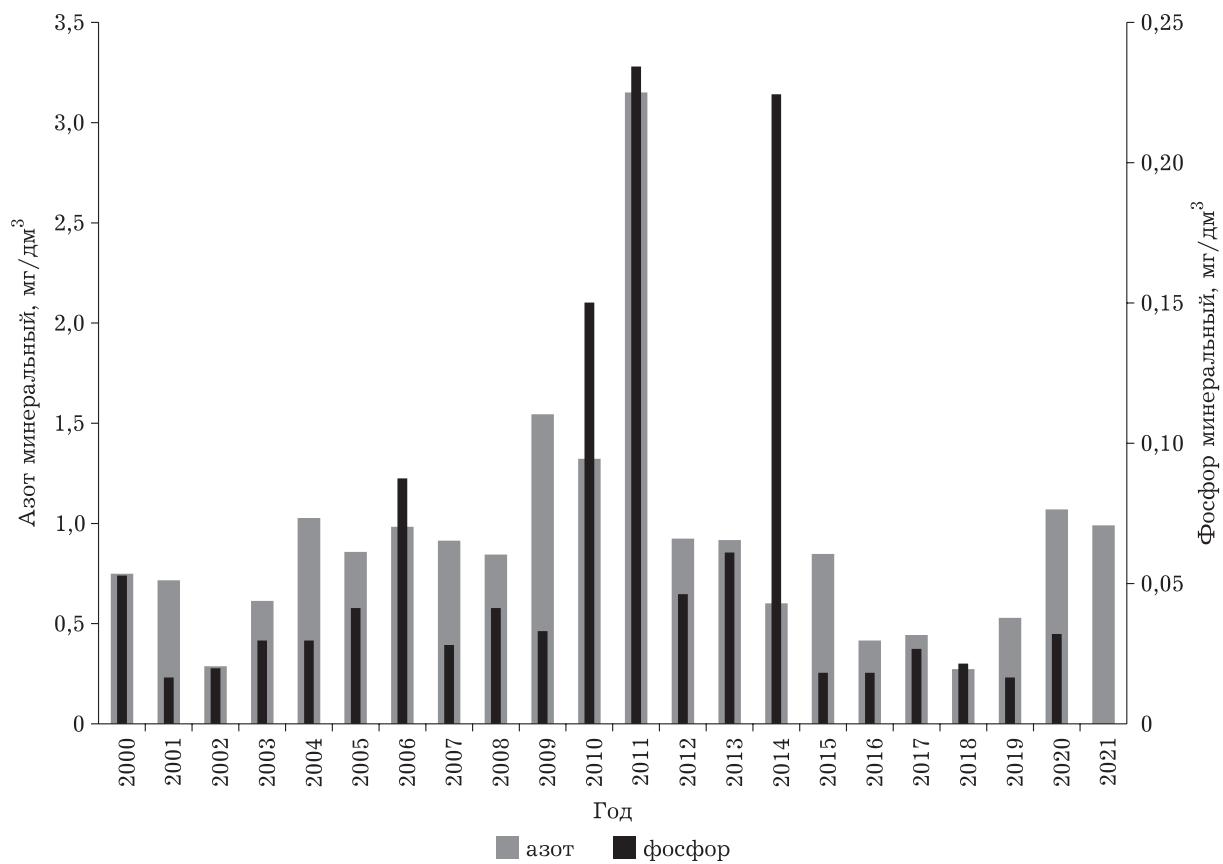


Рис. 3. Динамика содержания минеральных форм азота и фосфора в воде оз. Раифское в 2000–2021 гг.

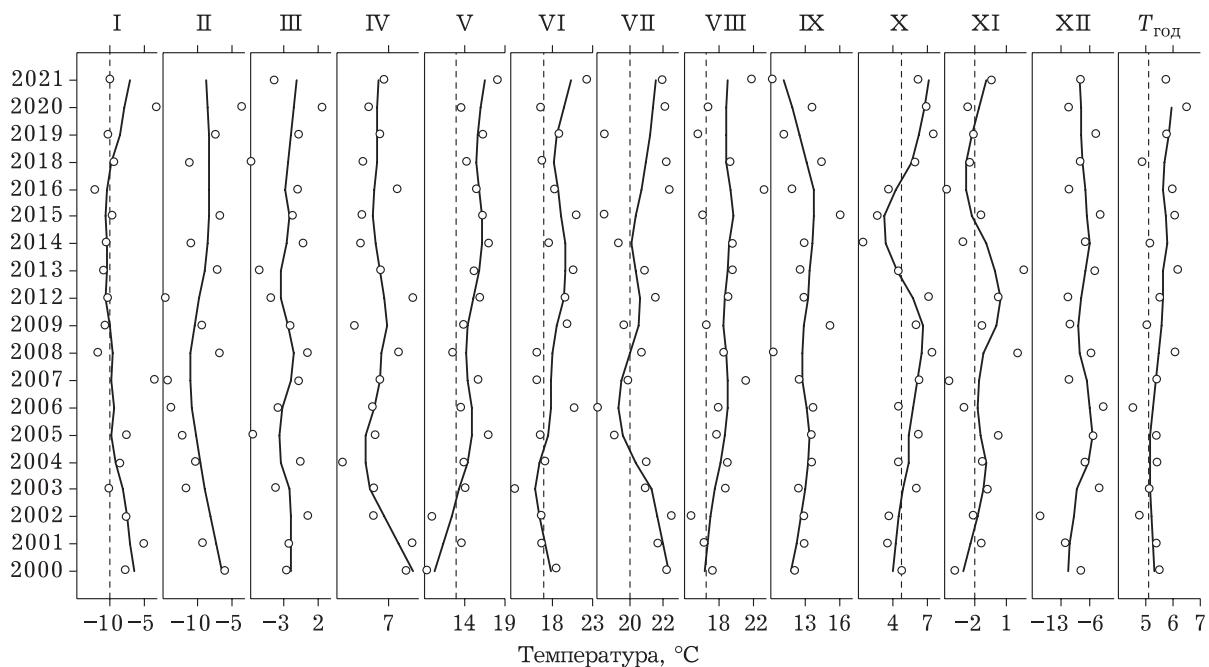


Рис. 4. Изменение температуры воздуха в районе оз. Раифское за период с 2000 по 2021 г.  $T_{\text{год}}$  – средняя температура воздуха за год,  $^{\circ}\text{C}$ ; I–XII – месяцы. Точки – среднемесячные значения температуры, линии – тренды

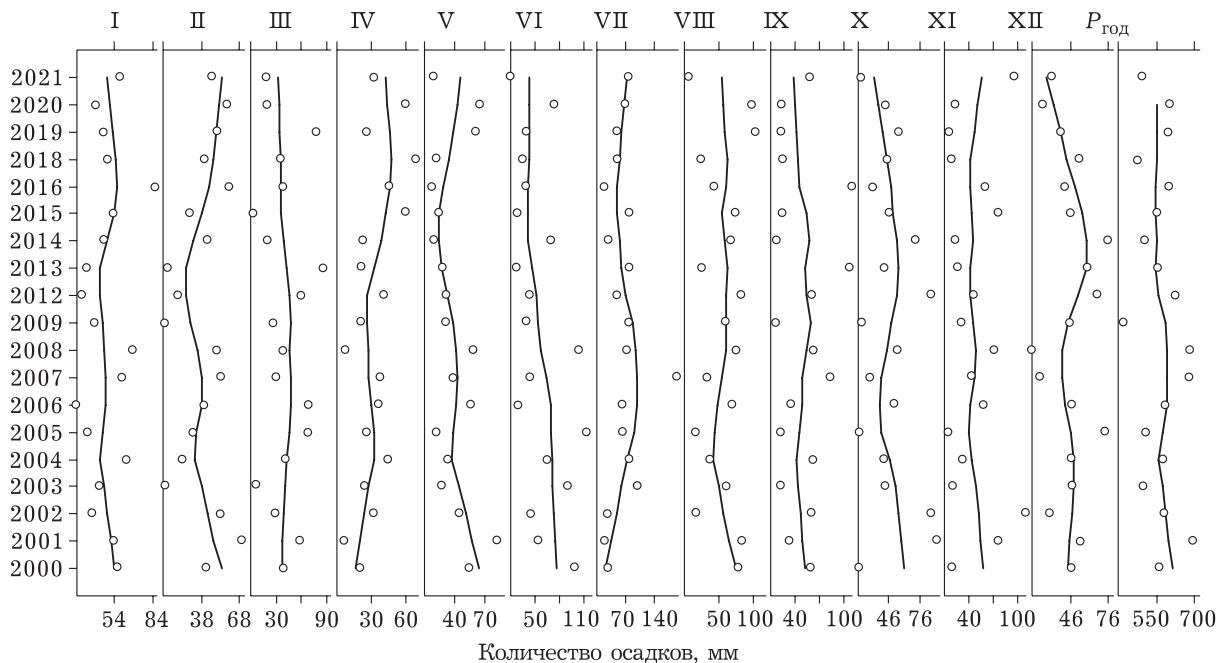


Рис. 5. Динамика количества выпадающих осадков в районе оз. Раифское за период с 2000 по 2021 г.  $P_{\text{год}}$  – количество осадков за год. Точки – среднемесячные величины осадков, линии – тренды

Исследования летнего фитопланктона оз. Раифское показали, что в период с 2000 по 2021 г. наблюдались значительные колебания летних значений биомассы (среднее  $2,3 \pm 1,9$  мг/л;  $C_V = 82\%$ ).

В структуре биомассы прослеживается тенденция к снижению доли диатомовых водорослей (с 16,7 % в конце XX в. до 0,2 % в начале XXI в.) и увеличению долей динофитовых (до 88 % в начале XXI в.) с доминантами *Ceratium hirundinella* (O. F. Müll.) Bergh, *Peridinium aciculiferum* Lemm., *Peridinium cinctum* (O.F.M.) и цианобактерий (до 65 % в начале XXI в.) с доминантами *Anabaena flos-aquae* Born. et Flah., *Lyngbya limnetica* Lemm. (рис. 6).

Проведенный анализ с участием всех экологических параметров показал, что минерализация, жесткость, концентрации аммонийного азота, нитритов, нитратов, среднегодовые значения температуры и количество осадков имели КВД выше 20. После удаления из анализа этих переменных по одному до тех пор, пока все КВД не стали ниже 20, минимальный набор не коррелирующих между собой экологических параметров составили среднемесячные температуры, количество осадков, pH и глубина. Однако тест Монте-Карло (с 999 перестановками) оставил

шихся в анализе экологических параметров показал, что значимую роль в изменениях биомассы фитопланктона ( $p \leq 0,05$ ) играет только среднеиюльская температура воздуха ( $T_{\text{июль}}$ ) (рис. 7).

Собственные значения осей АИ 1 и 2 ( $\lambda_1 = 0,452$  и  $\lambda_2 = 0,229$ ) значимой переменной составили 87 и 76,3 % от собственных значений осей АИ 1 и 2 полного набора переменных ( $\lambda_1 = 0,519$  и  $\lambda_2 = 0,305$ ), что говорит о том, что удаление коррелирующих и незначимых переменных оказало незначительное влияние на эффективность анализа. Наибольшую связь с параметром “ $T_{\text{июль}}$ ” продемонстрировали динофитовые водоросли, биомасса которых положительно коррелирует с ростом температуры. Отрицательная корреляция роста июльской температуры выявлена для биомассы диатомовых, эвгленовых и зеленых водорослей (см. рис. 7).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование выявило отсутствие негативных тенденций в изменении химического состава воды. Озеро имело относительно постоянный трофический статус, в большинстве случаев мезотрофный.

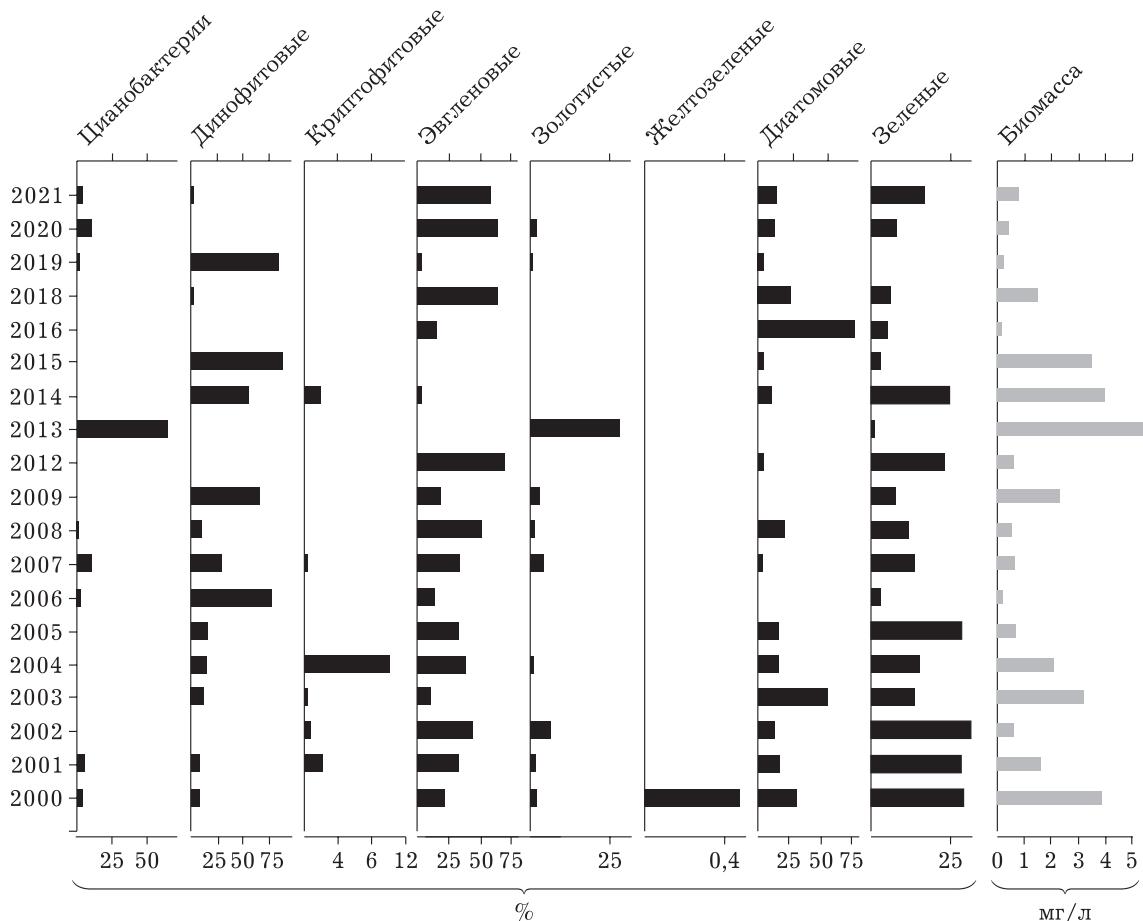


Рис. 6. Изменение биомассы разных отделов водорослей в летнем фитопланктоне оз. Раифское за период с 2000 по 2021 г. Биомасса – общая биомасса летнего фитопланктона в единичных усредненных по столбу воды пробах. Для отделов фитопланктона данные представлены в процентах от общего значения биомассы

Наши более ранние исследования (1997–1998 гг.) летнего фитопланктона карстовых озер Среднего Поволжья [Палагушкина, 2004] показали, что в озерах лесной зоны биомасса летнего фитопланктона складывалась в основном диатомовыми (28,5 %), динофитовыми (26,4 %) и эвгленовыми (18,6 %) водорослями. Золотистые водоросли вносили 6,6 %, а цианобактерии – 5,3 % в общую биомассу. При переходе к лесостепной зоне в биомассе фитопланктона отмечалось снижение роли золотистых (биомасса менее 1 %) и диатомовых (15 %) и увеличение роли динофитовых (до 30,7 %) и цианобактерий (до 26,8 %) [Палагушкина, 2004] (рис. 8).

Известно, что основные механизмы воздействия на климат включают изменения в интенсивности поступающей солнечной радиации, температуры воздуха и осадков [Williamson et al., 2009]. Реакция озер и водо-

хранилищ в качестве индикаторов современного изменения климата включает в себя изменения физических (уровень и прозрачность воды, ее температура, термическая стратификация, толщина и продолжительность ледяного покрова) и химических (растворенное органическое вещество, концентрация кислорода, круговорот питательных веществ) параметров [Stief et al., 2005; Williamson et al., 2009; Шашуловская и др., 2021]. Количество выпадающих осадков в большинстве регионов мира не увеличивается, а в некоторых случаях даже уменьшается, что приводит к сокращению площадей озер и объемов воды в них [Golovatyuk et al., 2020; Woolway et al., 2020].

Взаимодействие между изменением климата и биотой озер является достаточно сложным и наблюдается во всем мире. Оно выражается, в частности, в изменении качества воды, связанном с увеличением биомассы фи-

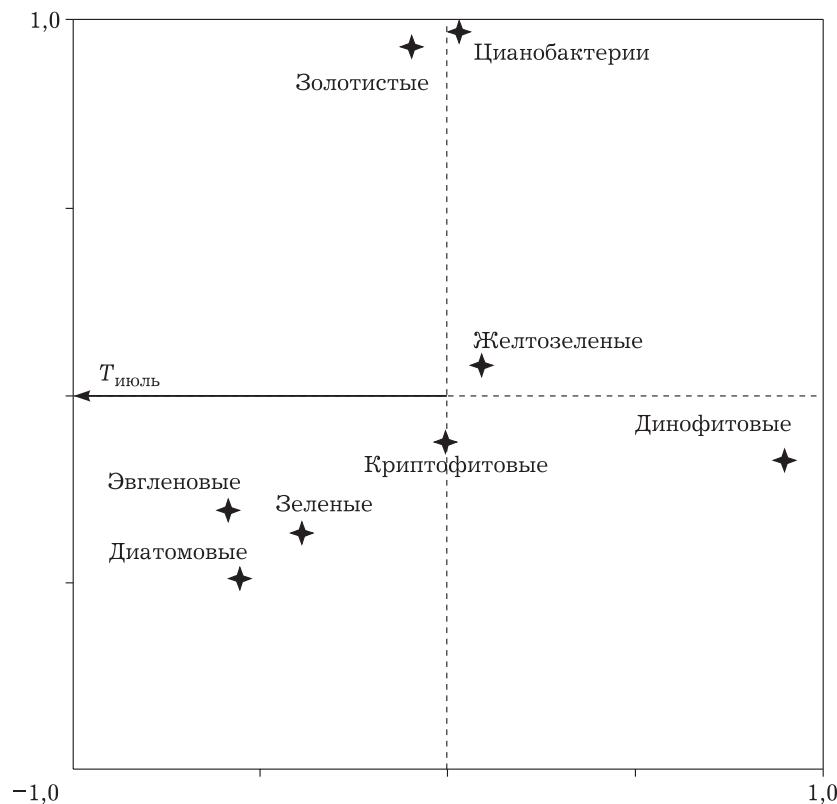


Рис. 7. Диаграмма, иллюстрирующая взаимосвязь между среднеиюльской температурой воздуха ( $T_{июль}$ ) и летней биомассой водорослей различных отделов в оз. Раифское

топланктона и изменениями в составе гидробиологических сообществ [Nazarova et al., 2017; Mayfield et al., 2020; Woolway et al., 2020; Бондаренко, 2022].

Особое внимание уделяется планкtonным организмам в качестве индикаторов изменения экосистемы, поскольку эти относительно короткоживущие организмы быстро реагируют на малозаметные температурные изменения в силу значительной скорости роста, как правило, высокой численности и богатого видового состава [Adrian et al., 2009; Palagushkina et al., 2020]. При наличии достаточных ресурсов повышение температуры обычно ускоряет темпы роста и развития отдельных организмов, что провоцирует изменения в структуре сообществ. Например, известно, что при более высоких температурах цианобактерии имеют конкурент-

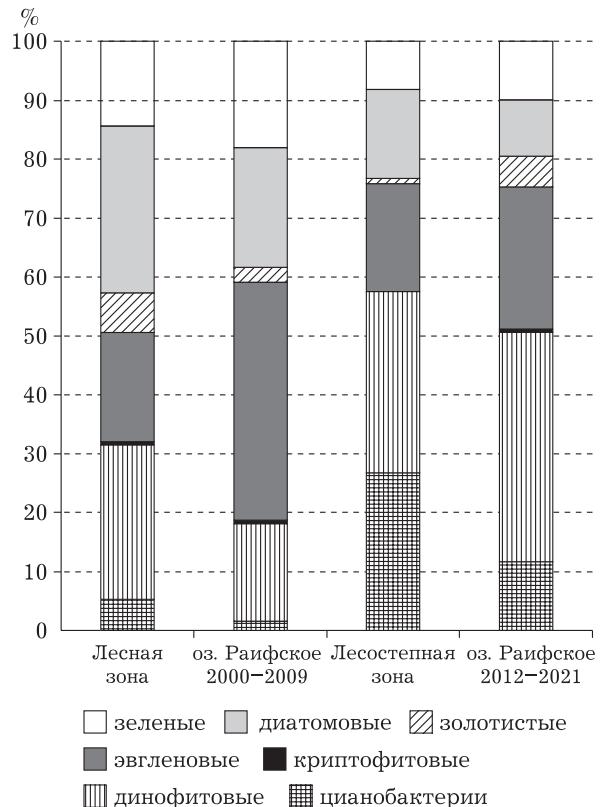


Рис. 8. Соотношение биомассы групп фитопланктона в озерах лесной и лесостепной зон Среднего Поволжья [Палагушкина, 2004] и в оз. Раифское в среднем за периоды исследования 2000–2009 и 2012–2021 гг.

ное преимущество перед другими группами фитопланктона [Трифонова, 1990]. Точно так же более сильная вертикальная стратификация может вызывать сдвиги в видовом составе фитопланктона, особенно среди таксономических групп, чувствительных к температуре и перемещиванию, таких как цианобактерии, диатомеи и жгутиковые. Нарушения в соотношении между этими группами можно рассматривать в качестве индикаторов климатических изменений в термически стратифицированных условиях [Adrian et al., 2009; Hoff et al., 2015]. Из динофитовых водорослей как представителей жгутиковых форм наибольшее значение имеет *Ceratium hirundinella* (O. F. Müll.) Bergh – один из доминантов летнего планктона, который встречается практически во всех типах озер умеренных широт. Его вегетация тесно связана с условиями стратификации, когда благодаря способности к вертикальным миграциям этот вид приобретает преимущества при дефиците биогенов [Трифонова, 1990; Палагушкина, 2004]. Также известно, что развитие *Ceratium hirundinella* (O. F. Müll.) Bergh увеличивается по мере эвтрофирования озер. В нашем случае на фоне стабильной биогенной нагрузки на заповедное оз. Раифское увеличение доли этого вида и водорослей этого отдела в общей биомассе летнего фитопланктона, вероятнее всего, связано с ранним наступлением стратификации из-за роста температуры воздуха. В озерах всех широт цианобактерии представлены в основном летними и летне-осенними видами. Их вегетация, как правило, приурочена к периоду наибольшего прогрева воды. Цианобактерии способны усваивать как окисленные, так и восстановленные формы азота. Наименее требовательны к источникам азота виды рода *Anabaena*, способные к азотфиксации. Накопление их биомассы в воде проходит независимо от количества азота в воде, поэтому именно представители этого рода появляются и в олиготрофных, и в мезотрофных озерах [Трифонова, 1990]. Доминирование *Anabaena flos-aquae* Born. et Flah. в формировании общего значения биомассы летнего фитопланктона на фоне стабильной биогенной нагрузки оз. Раифское, на наш взгляд, можно объяснить ростом температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало невысокую вариабельность гидрохимических показателей и биомассы фитопланктона оз. Раифское за период с 2000 по 2021 г. При этом в структуре фитопланктонах сообществ наблюдаются перестройки с тенденцией на снижение доли диатомовых, эвгленовых и зеленых и увеличением доли динофитовых водорослей в общей биомассе летнего фитопланктона. Анализ данных показывает ведущее значение температурного фактора (в частности, среднеиюльской температуры воздуха) в происходящих изменениях. Однако влияние влажности климата (в виде количества осадков) на сообщество фитопланктона выявлено не было. Сравнение с нашими более ранними наблюдениями указывает на то, что в результате изменения климатических условий структура биомассы летнего фитопланктона заповедного озера лесной зоны Среднего Поволжья приобретает особенности структуры сообществ озер лесостепной зоны.

О. В. Палагушкина и Л. Б. Назарова были поддержаны за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FZSM-2023-0023) и средств проекта РНФ № 24-17-00143.

## ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 446 с.
- Бондаренко Н. А. Пространственно-временной анализ развития нанопланкtonных динофитовых в оз. Байкал // Биология внутр. вод. 2022. № 3. С. 247–255. <https://doi.org/10.31857/S0320965222030020>
- Голлербах М. М., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 1. Общая часть. Пресноводные водоросли и их изучение. М.: Сов. наука, 1951. 200 с.
- Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 2. Синезеленые водоросли. М.: Сов. наука, 1953. 652 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Голлербах М. М. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 5. Желтозеленые водоросли. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 272 с.
- Забелина М. М., Киселева И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 4. Диатомовые водоросли. М.: Сов. наука, 1951. 620 с.
- Киселев И. А. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 6. Пирофитовые водоросли. М.: Сов. наука, 1954. 212 с.

- Коэффициент вариации <https://wiki.loginom.ru/articles/variation-coefficient.html>
- Матвиенко А. М. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 3. Золотистые водоросли. М.: Наука, 1954. 188 с.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
- Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.
- Палагушкина О. В. Экология фитопланктона карстовых озер Среднего Поволжья: дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2004. 197 с.
- Палагушкина О. В., Бариева Ф. Ф., Унковская Е. Н. Видовой состав, биомасса и продуктивность фитопланктона озер Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волжско-Камского гос. природ. заповедника. 2002. № 5. С. 9–37.
- Паламарь-Мордвинцева Г. М. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 11. Зеленые водоросли. Класс Коньогаты. Порядок Десмидиевые (2). Chlorophyta: Conjugatophyceae. Desmidiales (2). Л.: Наука, 1982. 620 с.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Изд-во ВНИРО, 1999. 304 с.
- Попова Т. Г. Определитель пресноводных водорослей СССР: Вып. 7. Эвгленовые водоросли. М.: Сов. наука, 1955. 281 с.
- Постановление Совета Министров РСФСР № 510. “Об организации в Татарской АССР Волжско-Камского государственного заповедника” 13 апреля 1960 г.
- Справочно-информационный портал “Погода и климат” <http://www.pogodaiklimat.ru/history/27595.htm>.
- Трифонова И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1990. 184 с.
- Трифонова И. С., Афанасьева А. Л., Бульон В. В., Беляков В. П., Бардинский Д. С., Воронцова Н. К., Генкаль С. И., Кондратьев С. А., Кудерский Л. А., Макарцева Е. С., Русанов А. Г., Сорокин И. Н., Станиславская Е. В., Ульянова Д. С., Чеботарев Е. Н. Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флюктуаций и эвтрофирования. СПб.: Изд-во “ЛЕМА”, 2008. 246 с.
- Унковская Е. Н., Тарасов О. Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волжско-Камского гос. природ. биосфер. заповедника. Казань, 2016. № 7. С. 9–40.
- Унковская Е. Н., Жариков В. В., Быкова С. В., Горбунов М. Ю., Уманская М. В., Тарасова Н. Г., Мухортова О. В., Палагушкина О. В., Деревенская О. Ю. Сообщества планктона озер Раифского (Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник). Биоразнообразие планктона озер Раифского // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2010. Т. 12 (33), № 1 (5). С. 1453–1460.
- Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Далечина И. Н. Многолетние изменения основных показателей трофического состояния крупного равнинного водохранилища под влиянием климатической трансформации и сукцессионных процессов // Биология внутр. вод. 2021. № 6. С. 547. <https://doi.org/10.31857/S0320965221060164>
- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., van Donk E. Lakes as sentinels of climate change // Limnol. Oceanogr. 2009. Vol. 54. P. 2283–2297.
- Birks H. J. B. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions (Statistical Modelling of Quaternary Science Data). Cambridge: Quaternary Research Association, 1995. P. 161–254.
- Biskaborn B. K., Nazarova L., Pestryakova L. A., Syrykh L., Funck K., Meyer H., Chaplgin B., Vyse S., Gorodnichev R., Zakharov E., Wang R., Schwamborn G., Diekmann B. Spatial distribution of environmental indicators in surface sediments of Lake Bolshoe Toko, Yakutia, Russia // Biogeosciences. 2019. Vol. 16. P. 4023–4049. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-146>
- Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama. Cambridge, N. Y.: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. doi:10.1017/9781009325844.
- Engels S., Medeiros A. S., Axford Y., Brooks S. J., Heiri O., Luoto T. P., Nazarova L., Porinchi D. F., Quinlan R., Self A. E. Temperature change as a driver of spatial patterns and long-term trends in chironomid (Insecta: Diptera) diversity // Global Change Biol. 2020. Vol. 26. P. 1155–1169. <https://doi.org/10.1111/gcb.14862>
- Golovatyuk L., Zinchenko T. D., Nazarova L. B. Macrozoobenthos community in saline Bolshaya Samoroda River (Volgograd region of Russian Federation): species composition, density, biomass and production// Aquat. Ecol. 2020. Vol. 54. P. 57–74, <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09726-z>
- Hoff K. A., Bashir M. Trust in Automation: Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust // Human Factors. 2015. Vol. 57 (3). P. 407–434. <https://doi.org/10.1177/0018720814547570>
- Juggins S. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 2007.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. Teil 1: Naviculaceae // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1986. P. 1–876.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 2: Epithemiaceae, Bacillariaceae, Suriellaceae // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1988. P. 1–536.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 3: Centrales, Fragilariaeae, Eunotiaceae // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1991a. P. 1–576.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 4: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1991b. Bd 2/4. P. 1–437.
- Kumke T., Ksenofontova M., Pestryakova L., Nazarova L., Hubberten H.-W. Limnological characteristics of lakes in the lowlands of Central Yakutia, Russia // J. Limnol. 2007. Vol. 66. P. 40–53. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2007.40>
- Mayfield R. J., Langdon P. G., C. Doncaster P., Dearing J. A., Wang R., Nazarova L. B., Medeiros A. S.,

- Brooks S. J. Metrics of structural change as indicators of chironomid community stability in high latitude lakes // *Quat. Sci. Rev.* 2020. Vol. 249. P. 106594. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106594>
- Nazarova L. B., Self A. E., Brooks S. J., Solovieva N., Syrykh L. S., Dauvalter V. A. Chironomid fauna of the lakes from the Pechora River basin (East of European part of Russian Arctic): ecology and reconstruction of recent ecological changes in the region // *Contemporary problems of Ecology*. 2017. Vol. 4. P. 350–362. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040059>
- Palagushkina O., Nazarova L., Frolova L. Trends in development of diatom flora from sub-recent lake sediments of the Lake Bolshoy Kharbey (Bolshezemelskaya tundra, Russia) // *Biol. Communicat.* 2020. Vol. 64. P. 244–251. <https://doi.org/10.21638/spbu03.2019.403244–250>
- Palagushkina O. V., Nazarova L. B., Wetterich S., Shirrmaister L. Diatoms of modern bottom sediments in Siberian Arctic // *Contemporary Problems of Ecology*. 2012. Vol. 5, N 4. P. 413–422. <https://doi.org/10.1134/S1995425512040105>
- Palagushkina O., Wetterich S., Schirrmeister L., Nazarova L. Modern and fossil diatom assemblages from Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago, Arctic Siberia) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. Vol. 4. P. 380–394. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040060>
- Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (eds.) *IPCC, Climate Change 2022. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Subetto D.A., Nazarova L. B., Pestryakova L. A., Syrykh L. S., Andronikov A. V., Biskaborn B., Diekmann B., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V., Grekov I. M. Palaeolimnological studies in Russian Northern Eurasia: A review // *Contemporary problems of Ecology*. 2017. Vol. 4. P. 327–335. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040102>
- Stief P., Höller F. Adaptive behaviour of chironomid larvae (*Chironomus riparius*) in response to chemical stimuli from predators and resource density // *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2005. Vol. 58. P. 256–263. <https://doi.org/10.1007/s00265-005-0932-8>
- ter Braak C. J. F., Šmilauer P. *CANOCO 4.5. Reference manual and CanoDraw for Windows, User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Ithaca. N. Y.: Microcomputer Power, 2002. 500 p.
- ter Braak C. J. F., Verdonschot P. F. M. Canonical correspondence-analysis and related multivariate methods in aquatic ecology // *Aquat. Sci.* 1995. Vol. 57. P. 255–289.
- Unkovskaya E. N., Galiakhmetova L. K., Shurmina N. V., Bogdanova O. A., Shakirova I. I., Ivanov D. V., Unkovskaya M. A. Hydrochemical indicators dynamics of the lakes of Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. Vol. 607. P. 012025.
- Wetterich S., Schirrmeister L., Nazarova L., Palagushkina O., Bobrov A., Pogosyan L., Savelieva L., Syrykh L., Matthes H., Fritz M., Gunther F., Opel T. Holocene thermokarst and pingo development in the Kolyma Lowland 1 (NE Siberia) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2018. Vol. 29, N 3. P. 182–198. <https://doi.org/10.1002/ppp.1979>
- Williamson C. E., Saros J. E., Vincent W. F., Smol J. P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54. P. 2273–2282.
- Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S. Global lake responses to climate change // *Nat. Rev. Earth & Environment*. 2020. Vol. 1. P. 388–403.

# **Influence of climate changes on the structure of summer phytoplankton in a forest zone lake (Raifskoye, Volga-Kama Nature reserve)**

O. V. PALAGUSHKINA<sup>1</sup>, E. N. UNKOVSKAYA<sup>2</sup>, L. B. NAZAROVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kazan (Volga Region) Federal University  
420008, Kazan, Kremlin str., 18  
E-mail: opalagushkina@mail.ru*

<sup>2</sup>*Volzhsko-Kama State Natural Biosphere Reserve  
422537, Republic of Tatarstan, Zelenodolsky district, pos. Sadovy, Vekhova str., 1  
E-mail: vkz@mail.ru*

Climate change, which causes significant structural transformations of ecosystems, is becoming one of the most acute environmental problems of our time. Monitoring observations in protected areas, where anthropogenic impacts are minimal, highlight the impact of climate on natural communities. We studied the changes in the structure of summer phytoplankton in Lake Raifskoe (Volga-Kama Reserve) and the relationships between these changes and environmental factors for more than twenty years. The study showed an increase in the proportion of dinophyte algae in the total biomass of summer phytoplankton in the studied lake situated in the forest zone. This structural change is more typical of the structure of lake communities in the forest-steppe zone. The climate, and particularly the air temperature of the warmest month (July), plays a leading role in the change in the structure of phytoplankton. The influence of climate humidity (precipitation) on the phytoplankton community was not revealed. Our data show that current climate changes lead to the rearrangement of phytoplankton communities, in which the structure of the biomass of the summer phytoplankton of the studied lake from the forest zone of the Middle Volga region can acquire features of the structure of lake communities from the forest-steppe zone.

**Key words:** biomass, climate change, monitoring, Raifskoe Lake, phytoplankton.