

Факторы зональности и их влияние на зоопланктон озёр Среднего Поволжья

© 2024. О. Ю. Деревенская¹, д. б. н., профессор,
Н. М. Мингазова¹, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,
Е. Н. Унковская², с. н. с.,

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлёвская, д. 18,

²Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник,
422537, Россия, пос. Садовый, ул. Вехова, д. 1,

e-mail: oderevenskaya@mail.ru, nmingas@mail.ru, l-unka@mail.ru

Проанализированы результаты исследований 176 разнотипных водоёмов Среднего Поволжья (Россия). Изучалось воздействие факторов окружающей среды (морфометрических показателей озёр, физико-химических показателей воды) на сообщества зоопланктона озёр двух ландшафтно-географических зон (лесной и лесостепной). Целью работы было выявление биоразнообразия пелагического зоопланктона и оценка роли факторов окружающей среды в развитии сообществ зоопланктона. В составе зоопланктона выявлено 230 видов, из них коловраток – 107 (45,6%), ветвистоусых ракообразных – 76 (33,6%), веслоногих ракообразных – 47 (20,8%). В озёрах лесной зоны выявлено большее число видов в пробе и более высокие количественные показатели по сравнению с озёрами лесостепной зоны. Величины этих показателей определяются комплексом факторов, важнейшими из которых являются морфометрические показатели озёр, содержание в воде минерального азота, кислорода, минерализация воды. Глубина водоёма может способствовать увеличению числа видов в пробе или их снижению, увеличение максимальной глубины способствует снижению количественных показателей зоопланктона. Высокая минерализация и высокое содержание биогенных элементов снижают число видов в пробе и количественные показатели зоопланктона. Рост концентрации минерального азота и среднего рангового показателя отрицательно связан с численностью зоопланктона, что обусловлено возникновением негативных последствий, связанных с антропогенным эвтрофированием. Большое влияние на состав и структуру сообществ зоопланктона в пределах ландшафтно-климатических зон оказывают местные условия, в том числе ионный состав воды и концентрация главных ионов, которые определяются не только принадлежностью к ландшафтно-географической зоне, но и преобладающим источником питания озера, а также степени антропогенной трансформации водоёма.

Ключевые слова: зоопланктон, биоразнообразие, озеро, Среднее Поволжье, сообщество, структура.

Zoning factors and their influence on the lakes' zooplankton in the Middle Volga Region (Russia)

© 2024. O. Yu. Derevenskaya¹ ORCID: 0000-0001-9473-4352²
N. M. Mingazova¹ ORCID: 0000-0002-8360-7005²

E. N. Unkovskaya² ORCID: 0000-0001-8822-5041²
¹Kazan Federal University,

18, Kremlin St., Kazan, Russia, 420008,

²Volga-Kama State Nature Biosphere Reserve,
1, Vekhova St., pos. Sadovy, Russia, 422537,

e-mail: oderevenskaya@mail.ru, nmingas@mail.ru, l-unka@mail.ru

We analyzed the results of studies of 176 different types of lakes in the Middle Volga region (Russia). The impact of various environmental factors (morphometric parameters of lakes, physical and chemical indicators of water) on the lakes' zooplankton communities of two landscape-geographical zones (forest and forest-steppe) was studied. The aim of the work was to identify the biodiversity of pelagic zooplankton and to assess the role of environmental factors in the development of zooplankton communities. Statistical studies included the calculation of the Spearman and Pearson correlation coefficients, data analysis using linear and logistic regression methods. We identify 230 species of zooplankton, including Rotifera – 107 (45.6%), Cladocera – 76 (33.6%), Copepoda – 47 (20.8%).

Forest lakes show more species in the sample and higher quantitative indices compared to the forest-steppe lakes. The values of these indicators are determined by a complex of factors, the most important of which are the morphometric parameters of the lakes, the content of mineral nitrogen, oxygen, water mineralization and its determining ions. The depth of the reservoir can increase in the number of species in the sample or decrease them. Zooplankton quantification decreases as maximum depth increases. In deep-water lakes they are usually lower than in well-warmed high-trophic and shallow ones. High mineralization and higher content of nutrients reduce the number of species in the sample and quantitative indicators of zooplankton. The increase in mineral nitrogen concentration and average ranking index is negatively related to zooplankton abundance, which is due to the occurrence of negative effects associated with anthropogenic eutrophication. Local conditions determine the composition and structure of zooplankton communities within the landscape-climatic zones, which determine the ionic composition of water and the concentration of major ions.

Keywords: zooplankton, biodiversity, lake, Middle Volga region, community, structure.

Состав и экологические особенности населения поверхностных вод находятся в зависимости от исторических, зональных и азональных природно-климатических факторов, а также степени антропогенной трансформации [1–3]. Во многих работах описаны изменения видового разнообразия и структуры сообществ гидробионтов в градиентах различных факторов окружающей среды, в том числе морфометрии, продуктивности озёр [4–7]. Значительное количество исследований посвящено выявлению последствий антропогенного воздействия различной силы на видовой состав и структуру сообществ зоопланктона [1, 2, 8–12]. Однако в формировании структуры сообществ зоопланктона немаловажное значение играют ландшафтно-географические и климатические условия. Поэтому важно расширить наши знания о распространении зоопланктона и о структуре зоопланктонных сообществ в различных ландшафтно-географических зонах.

Среднее Поволжье – часть Русской равнины, занимает площадь 146,4 тыс. км². По административному делению на данной территории располагаются Республики Татарстан, Марий Эл, Чувашия и Ульяновская область. Среднее Поволжье располагается в пределах двух ландшафтно-географических зон – лесной и лесостепной. Климат региона умеренно-континентальный. В пределах рассматриваемой территории выделяют пять провинций, относящихся к лесной (Низменное Заволжье, Вятско-Камская возвышенность) и лесостепной (Приволжская возвышенность, Низменное Заволжье, Высокое Заволжье) зонам (рис.) [13].

Цель работы – выявить особенности состава и структуры планктонных коловраток и ракообразных в водоёмах из различных ландшафтно-географических зон Среднего Поволжья.

Материал и методы исследования

В период с 1989 г. по 2017 г. было исследовано 176 разнотипных водоёмов, расположенных на территории Среднего Поволжья (рис. 1, табл. 1). Для каждого из них выявлены гидрологические, гидрохимические характеристики, показатели сообществ зоопланктона.

Пробы зоопланктона отбирали в летний период однократно, либо на протяжении нескольких лет. На глубоководных озёрах пробы отбирали путём облавливания сетью Джели (размер ячеек – 100 мкм) слоёв воды, выделенных в соответствии со стратификацией по температуре, на мелководных – сетью Джели от дна до поверхности или процеживанием воды через сеть Апштейна (50–100 л). Камеральная обработка включала определение видового состава зоопланктона, численности и биомассы. Индивидуальные массы организмов рассчитывали по степенным уравнениям, связывающим длину организмов с их массой [14].

Пробы воды для гидрохимического анализа отбирали параллельно с отбором проб зоопланктона, отдельно из поверхностных и придонных слоёв воды. Измеряли прозрачность воды, электропроводность, содержание растворённого кислорода. В лабораторных условиях анализировали содержание органических веществ (по ХПК и перманганатной окисляемости), PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , а также жёсткость и минерализацию воды. Оценка качества воды проводилась по среднему ранговому показателю (РП) [15].

Статистические исследования включали проверку данных на нормальность распределения с использованием критерия Шапиро-Уилка, расчёт коэффициентов корреляции Спирмена и Пирсона, анализ данных с использованием методов линейной и логистической регрессии. Массив данных состоял из 414 наблюдений, включал 66 качественных и

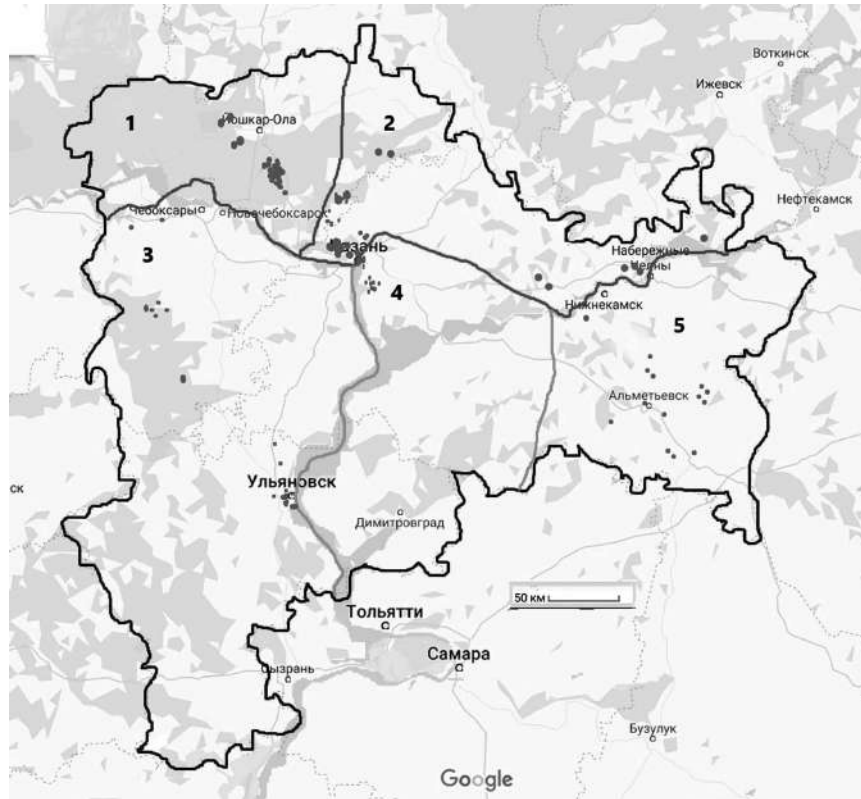


Рис. Карта-схема Среднего Поволжья. Провинции: 1 – Низменное Заволжье (лесная зона), 2 – Вятско-Камская возвышенность (лесная зона), 3 – Приволжская возвышенность (лесостепная зона), 4 – Низменное Заволжье (лесостепная зона), 5 – Высокое Заволжье (лесостепная зона). Точками показаны места расположения озёр / **Fig.** Schematic map of the Middle Volga region. Provinces: 1 – Nizmennoye Zavolzh'ye (forest zone), 2 – the Vyatka-Kama Upland (forest zone), 3 – the Volga Upland (forest-steppe zone), 4 – Nizmennoye Zavolzh'ye (forest-steppe zone), 5 – Vysokoye Zavolzh'ye (forest-steppe zone). The dots show the locations of the lakes

Таблица 1 / Table 1

Число водоёмов разных типов, исследованных в провинциях Среднего Поволжья
The number of different types water bodies studied in the provinces of the Middle Volga region

Тип / Type	Лесная зона / Forest zone		Лесостепная зона / Forest-steppe zone		
	Низменное Заволжье The Nizmennoye Zavolzh'ye	Вятско-Камская возвышенность The Vyatka-Kama Upland	Предволжье The Predvolzh'ye	Низменное Заволжье The Nizmennoye Zavolzh'ye	Высокое Заволжье The Vysokoye Zavolzh'ye
Карстовые Karst lakes	22	43	1	10	1
Пойменные, старичные Floodplain lakes, oxbows	2	19	9	9	3
Суффозионные Suffusion lakes	1	15	1	5	0
Искусственные Ponds	0	9	10	5	11

количественных признаков. Процедуры статистического анализа выполняли с помощью пакетов SAS 9.2, STATISTICA 6.0.

Результаты и обсуждение

В составе пелагического зоопланктона водоёмов Среднего Поволжья в ходе настоящих исследований было выявлено 230 видов, из них коловраток – 107 (45,6%), ветвистоусых ракообразных – 76 (33,6%), веслоногих ракообразных – 47 (20,8%). Встреченные виды зоопланктона относились к 36 семействам 14 отрядов коловраток и ракообразных.

Наибольшее число видов было встречено в озёрах Вятско-Камской возвышенности (лесная зона), однако, это связано, в первую очередь, с большим числом исследованных озёр и с высокой периодичностью пробоотборов. Среднее же число видов в пробе в озёрах из различных провинций Среднего Поволжья различалось не столь значительно. Наименьшее число видов в пробе было в озёрах Низменного (11,9±0,6) и Высокого Заволжья (12,1±0,6) лесостепной зоны, а наибольшее – в озёрах Вятско-Камской возвышенности лесной зоны (15,8±0,2).

Среднее число видов в пробе в водоёмах из провинций, относящихся к лесостепной зоне, коррелирует ($p < 0,05$) с морфометрическими показателями озёр, содержанием в воде органических веществ, концентрацией хлоридов и фосфатов (табл. 2). В Предволжье, где преобладают неглубокие пойменные и искусственные по происхождению водоёмы, корреляция между числом видов в пробе и морфометрическими показателями (площадью и объёмом озёр) отрицательная, а в Низменном Заволжье, где преобладают глубоководные карстовые и среднеглубинные пойменные озёра – положительная. Озёра Низменного Заволжья испытывают более сильное антропогенное воздействие и имеют более высокий трофический статус, поэтому для них выявлена положительная корреляция числа видов в пробе с содержанием кислорода в воде и отрицательная – с содержанием в воде органических веществ.

В водоёмах лесной зоны выявлена положительная корреляция ($p < 0,05$) среднего числа видов зоопланктона в пробе с морфометрическими показателями озёр (табл. 2). В Низменном Заволжье лесной зоны этот показатель положительно коррелирует также с содержанием гидрокарбонатов, а в более загрязнённых озёрах Вятско-Камской возвы-

шенности – с рН воды, содержанием кислорода и отрицательно – с концентрацией азота минерального, фосфора, минерализацией и компонентами, её обуславливающими (кальций, магний, гидрокарбонаты), а также содержанием органических веществ и средним РП.

Средние значения численности и биомассы зоопланктона были более высокими в провинциях, относящихся к лесной зоне и ниже в провинциях, относящихся к лесостепной зоне. В водоёмах лесной зоны количественные показатели зоопланктона отрицательно коррелируют ($p < 0,05$) с морфометрическими показателями озёр. Поскольку озёра в основном глубоководные, то весьма существенным фактором, определяющим развитие зоопланктона, становится содержание кислорода в воде. Значения численности зоопланктона водоёмов Вятско-Камской возвышенности отрицательно коррелируют с минерализацией и ионами, её обуславливающими и концентрацией минерального азота (табл. 3).

В водоёмах лесостепной зоны выявлена корреляция ($p < 0,05$) между количественными показателями зоопланктона и содержанием в воде минерального азота, морфометрическими показателями озёр, минерализацией и ионами её обуславливающими (табл. 3). В Предволжье и Низменном Заволжье общая численность зоопланктона и численность многих родов отрицательно коррелируют с содержанием минерального азота в воде. В Низменном Заволжье количественные показатели зоопланктона положительно коррелируют с морфометрическими показателями озёр, отрицательно – с минерализацией воды. Тот факт, что наибольшее развитие зоопланктона отмечается в водоёмах со средней минерализацией, отмечали и другие исследователи [3].

В экосистемах, являющихся сложными системами, каждое явление определяется действием не одной причины, а нескольких и даже комплекса. Регрессия позволяет выявить зависимость одной случайной переменной от другой или нескольких других случайных переменных.

Уравнения линейной регрессии были построены в подгруппах признака «Географическая приуроченность». Выделено 2 подгруппы: водоёмы лесостепной и лесной зоны. Анализировались взаимосвязи с зависимой переменной «Численность зоопланктона» и потенциальными предикторами в натуральном и логарифмическом выражении. Использовано два вида алгоритмов построения модели: пошаговый отбор предикторов и их

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции Спирмена ($p < 0,05$) между числом видов зоопланктона в пробе и факторами окружающей среды в различных провинциях Среднего Поволжья
Spearman's correlation coefficients ($p < 0.05$) between the number of species in the sample and environmental factors in various provinces of the Middle Volga region

Показатель / Index	Лесостепная зона / Forest-steppe zone			Лесная зона / Forest zone	
	Высокое Заволжье Vysokoye Zavolzh'ye	Предволжье Predvolzh'ye	Низменное Заволжье Nizmennoye Zavolzh'ye	Вятско-Камская возвышенность The Vyatka-Kama Upland	Низменное Заволжье Nizmennoye Zavolzh'ye
Площадь озера Lake area	–	-0,506	0,49	0,383	–
Максимальная глубина Maximum depth	–	–	0,551	0,42	–
Средняя глубина Average depth	–	–	0,47	0,371	–
Объём озера Lake volume	–	-0,551	0,502	0,382	–
Перманганатная окисляемость Permanganate oxidizability	0,79	–	–	-0,232	–
Минерализация Mineralization	–	–	–	-0,443	–
РП / Water quality rank indicator	–	–	–	-0,121	–
Поверхностные слои воды / Surface layers of water					
pH	–	–	–	0,198	–
O ₂	–	–	–	0,212	–
ХПК / COD	–	–	-0,786	–	–
БПК ₅ / BOD ₅	–	–	-0,354	–	–
Азот минеральный Mineral nitrogen	–	–	–	-0,236	–
Ca ²⁺	–	–	–	-0,283	–
Mg ²⁺	–	–	–	-0,249	–
PO ₄ ³⁻	–	–	0,386	-0,148	–
SO ₄ ²⁻	–	–	–	-0,18	–
Cl ⁻	0,795	–	–	–	–
HCO ₃ ⁻	–	–	–	-0,159	0,359
Придонные слои воды / Bottom layers of water					
ХПК / COD	–	–	-0,714	-0,275	–
БПК ₅ / BOD ₅	–	–	-0,536	–	–
O ₂	–	–	0,371	0,286	–

Примечание к таблицам 2 и 3: «–» – коэффициент не значим.
Note to tables 2 and 3: “–” – the coefficient is not significant.

Таблица 3 / Table 3

Значения коэффициентов корреляции Спирмена между численностью (N) и биомассой (B) зоопланктона и факторами окружающей среды провинций Среднего Поволжья ($p < 0,05$)
 Values of Spearman's correlation coefficients between the abundance (N) and biomass (B) of zooplankton and environmental factors in the provinces of the Middle Volga region ($p < 0.05$)

Показатель / Index	Лесная зона Forest zone				Лесостепная зона Forest-steppe zone		
	Вятско-Камская возвышенность The Vyatka-Kama Upland		Низменное Заволжье Nizmennoye Zavolzh'ye		Низменное Заволжье Nizmennoye Zavolzh'ye		Предволжье Predvolzh'ye
	N	B	N	B	N	B	N
Площадь озера Lake area	-	-	-	-	0,410	0,569	-
Максимальная глубина Maximum depth	-0,238	-	-0,405	-	0,376	0,476	-
Средняя глубина Average depth	-0,276	-	-	-	-	0,430	-
Объём озера Lake volume	-	0,171	-	-	0,401	0,573	-
Минерализация Mineralization	-	-	-	-	-	-	-0,245
Поверхностные слои воды / Surface layers of water							
pH	-	0,193	-	-	-	0,406	-
O ₂	-	0,169	0,447	-	-	0,346	-
БПК ₅ / BOD ₅	0,2761	-	-	-	-	-	-
Азот минеральный Nitrogen mineral	-0,170	-	-	-	-	-	-0,564
Ca ²⁺	-0,212	-	-	-	-	-	-
Mg ²⁺	-0,207	-	-	-	-	-	-
Fe	0,189	-	-	-	-	-0,378	-
PO ₄ ³⁻	-	-	-	-	0,404	0,542	-
SO ₄ ²⁻	-0,266	-	-	-	-	-	-
Cl ⁻	-0,168	-	-	-	-	-	-
HCO ₃ ⁻	-0,203	-	-	-	-	-	-
Придонные слои воды / Bottom layers of water							
pH	-	0,178	-	-	-	-	-
O ₂	-	0,201	-	0,401	-	-	-
ПП / Water quality rank indicator	-	-0,188	-	-	-	-	-

обратное исключение. Для каждого случая были построены по 3 уравнения регрессии, для дальнейшего анализа использовали те уравнения, в которых были получены наиболее сильные связи (по коэффициенту R²).

В подгруппе «водоёмы лесостепной зоны» для анализа использовано 35 наблюдений.

Наилучшая модель имеет скорректированный коэффициент R² = 0,5452, модель значимая ($p < 0,0001$).

Уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$N = 3,05082 - 0,04526 \cdot X_1 + 0,20203 \cdot X_2 - 0,18134 \cdot X_3 + 0,45717 \cdot X_4,$$

где X_1 – отношение площади озёра к глубине, X_2 – средняя глубина, м, X_3 – азот минеральный в поверхностных слоях воды, мг/л, X_4 – средний РП.

Сравнение стандартизированных коэффициентов показывает, что в озёрах лесостепной зоны наибольшее влияние на численность зоопланктона оказывают показатели глубины озёр, концентрация азота минерального и средний РП. Причём рост концентрации минерального азота отрицательно связан с численностью зоопланктона, что может быть следствием негативных процессов, вызванных антропогенным эвтрофированием [16, 17].

В подгруппе «водоёмы лесной зоны» для анализа использовано 277 наблюдений. Скорректированный на объём коэффициент $R^2 = 0,3435$, модель значимая ($p < 0,0001$).

Уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$N = -0,65089 + 8,83074 \cdot X_1 - 0,10344 \cdot X_2 + 0,00498 \cdot X_3 - 0,15544 \cdot X_4 + 3,55166 \cdot X_5 - 5,07003 \cdot X_6 + 0,40622 \cdot X_7 - 0,312273 \cdot X_8 + 3,30381 \cdot X_9$$

где X_1 – коэффициент ёмкости, X_2 – отношение площади озера к средней глубине, X_3 – концентрация гидрокарбонатов, мг/л, X_4 – средний РП, X_5 – натуральный логарифм максимальной глубины, X_6 – натуральный логарифм средней глубины, X_7 – натуральный логарифм объёма воды, X_8 – натуральный логарифм концентрации гидрокарбонатов, X_9 – натуральный логарифм среднего РП.

В уравнение вошло довольно большое число предикторов, однако вклад их неодинаков. Сравнение стандартизированных коэффициентов показывает, что наибольшее влияние на величину численности зоопланктона в озёрах лесной зоны оказывает глубина (средняя и максимальная) в логарифмическом выражении, причём с ростом максимальной глубины показатели численности зоопланктона снижаются, что подтверждает результаты, полученные с использованием коэффициентов корреляции Спирмена и Пирсона.

Для оценки наличия многомерных связей между одной группирующей переменной и остальными качественными и количественными признаками был выполнен регрессионный

Таблица 4 / Table 4

Предикторы, вошедшие в уравнение логистической регрессии с наибольшими стандартизированными коэффициентами / Predictors included in the logistic regression equation with the most standardized coefficients

Предиктор Predictor	Регрессионный коэффициент Regression coefficient	Уровень значимости Pr > ChiSq	Стандартизованный коэффициент Standardized coefficient
Свободный член 1 Intercept 1	-9,9719	0,0003	-
Свободный член 2 Intercept 2	-6,5929	0,0124	-
Свободный член 3 Intercept 3	-6,0655	0,0211	-
Свободный член 4 Intercept 4	-4,7541	0,0690	-
LN_PR1	-49,9512	< 0,0001	-27,4193
LN_PR2	44,4529	< 0,0001	22,4822
LN_PR3	-46,4456	< 0,0001	-8,7230
LN_PR4	3,8372	< 0,0001	5,0194
PR5	-0,0153	0,0217	-4,9754
LN_PR5	5,8058	0,0269	4,7311
LN_PR6	-5,7405	0,0268	-4,4016

Примечание: LN_PR1 – натуральный логарифм максимальной глубины озёр, м; LN_PR2 – натуральный логарифм средней глубины озёр, м; LN_PR3 – натуральный логарифм коэффициента ёмкости озёр; LN_PR4 – натуральный логарифм объёма озёр, тыс. м³; PR5 – численность зоопланктона, тыс. экз./м³; LN_PR5 – натуральный логарифм численности зоопланктона, тыс. экз./м³; LN_PR6 – натуральный логарифм биомассы зоопланктона, г/м³; «-» – показатель не имеет смысла.

Note: LN_PR1 – natural logarithm of the maximum lake depth, m; LN_PR2 – natural logarithm of the average lake depth, m; LN_PR3 – natural logarithm of the lake capacity factor; LN_PR4 – natural logarithm of the lake volume, thousand m³; PR5 – the abundance of zooplankton, thousand ind./m³; LN_PR5 – natural logarithm of zooplankton abundance, thousand ind./m³; LN_PR6 – natural logarithm of zooplankton biomass, g/m³; “-” – the indicator doesn't make sense.

анализ. При построении модели применяли 2 алгоритма анализа – пошаговый отбор предикторов и их обратное исключение. Надёжность модели оценивалась уровнем значимости, показателем качества модели являлся коэффициент конкордации, а интенсивности связи – коэффициент D-Зомера. В качестве зависимой выступала качественная переменная «Географическая приуроченность». Было выделено 5 подгрупп в соответствии с принадлежностью озёр к провинциям Среднего Поволжья. Анализ проведён между зависимой переменной и всеми качественными и количественными признаками, имеющими не менее 400 измерений. Построено 4 модели, лучшая из них имела процент конкордации 92,1 и коэффициент D-Зомера 0,847. Предикторы, вошедшие в уравнение регрессии, представлены в таблице 4.

При сравнении стандартизованных коэффициентов выявлено, что наибольшее влияние на различие сравниваемых групп оказывают максимальная и средняя глубины в логарифмическом выражении. Таким образом, результаты регрессионного анализа подтверждают выводы, полученные при анализе результатов корреляции и линейной регрессии.

Заключение

Исследования показали, что в озёрах лесной зоны отмечалось большее число видов в пробе и более высокие количественные показатели зоопланктона по сравнению с озёрами лесостепной зоны. Величины этих показателей определяются комплексом факторов, важнейшими из которых являются морфометрические показатели озёр, содержание в воде минерального азота, кислорода, минерализация воды и ионы, её определяющие. Глубина водоёма может способствовать увеличению среднего числа видов в пробе или их снижению. С увеличением максимальной глубины снижаются количественные показатели зоопланктона. Так, в глубоководных озёрах они, как правило, ниже, чем в хорошо прогреваемых неглубоких озёрах. Высокая минерализация и высокое содержание биогенных элементов влияют на среднее число видов в пробе и количественные показатели зоопланктона, способствуют их снижению. Рост концентрации минерального азота и среднего РП отрицательно связан с численностью зоопланктона, что обусловлено возникновением негативных последствий, связанных с антропогенным эвтрофированием. Большое влияние на состав и

структуру сообществ зоопланктона в пределах ландшафтно-климатических зон оказывают местные условия, в том числе ионный состав воды и концентрация главных ионов, которые определяются не только принадлежностью к ландшафтно-географической зоне, но и преобладающим источником питания, а также степенью антропогенной трансформации водоёма.

Авторы выражают глубокую благодарность инженеру КФУ Л. Р. Павловой за помощь в проведении анализов воды, а также к. т. н. В. П. Леонову (Центр BIOSTATISTICA) за помощь в проведении статистических расчётов.

Литература

1. Иванова М.Б. Изучение воздействия абиотических факторов среды на развитие гидробионтов в озёрах и значение сравнительно-лимнологических исследований // Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем. Л.: Наука, 1987. С. 35–44.
2. Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озёрных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
3. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб: Наука, 2013. 339 с.
4. Post D.M., Pace M.L., Hairston N.G.Jr. Ecosystem size determines food-chain length in lakes // Nature. 2000. V. 405. P. 1047–1049. doi: 10.1038/35016565
5. Gyllström M., Hansson L.-A., Jeppesen E., García Criado F., Gross E., Irvine K., Kairesalo T., Kornijów R., Miracle M.R., Nykänen M., Nöges T., Romo S., Stephen D., Van Donk E., Moss B. The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes // Limnol. Oceanogr. 2005. V. 50. No. 6. P. 2008–2021. doi: 10.4319/lo.2005.50.6.2008
6. Alimov A.F. Biological diversity and the community structure of organisms // Inland Water Biology. 2010. V. 3. No. 3. P. 207–213. doi: 10.1134/S1995082910030016
7. Drago L., Panaïotis T., Irissou J.-O., Babin M., Biard T., Carlotti F., Coppola L., Guidi L., Hauss H., Karp-Boss L., Lombard F., McDonnell A.M.P., Picheral M., Rogge A., Waite A.M., Stemann L., Kiko R. Global distribution of zooplankton biomass estimated by *in situ* imaging and machine learning // Front. Mar. Sci. 2022. V. 9. Article No. 894372. doi: 10.3389/fmars.2022.894372
8. Derevenskaya O.Yu., Mingazova N.M. Communities of zooplankton in lakes in the course of their contamination and restoration // Hydrobiological Journal. 2000. V. 36. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1615/HydrobJ.v36.i1.10
9. Alprol A.E., Heneash A.M.M., Soliman A.M., Ashour M., Alsanie W.F., Gaber A., Mansour A.T. Assessment of water quality, eutrophication, and zooplankton community in lake Burullus, Egypt // Diversity. 2021. V. 13. No. 6. P. 268–275. doi: 10.3390/d13060268

10. Rosińska J., Kowalczywska-Madura K., Kozak A., Romanowicz-Brzozowska W., Goldyn R. Were there any changes in zooplankton communities due to the limitation of restoration treatments? // *Limnol. Rev.* 2021. V. 21. No. 2. P. 91–104. doi: 10.2478/limre-2021-0009

11. Деревенская О.Ю. Сукцессии зоопланктона малых мелководных озёр после проведения мероприятий по экореабилитации // *Трансформация экосистем.* 2022. Т. 5. № 2. С. 74–85. doi: 10.23859/estr-220207

12. Лоскутова О.А., Кононова О.Н. Зообентос и зоопланктон предгорных озёр Приполярного Урала // *Теоретическая и прикладная экология.* 2022. № 2. С. 56–62. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-056-062

13. Озёра Среднего Поволжья / Отв. ред. И.Н. Сорочкин, Р.С. Петрова. Л.: Наука, 1976. 236 с.

14. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах. Зоопланктон и его продукция / Ред. Г.Г. Винберг, Г.М. Лаврентьева, Ю.А. Барулин. Л.: ГосНИОРХ, 1982. 33 с.

15. Романенко В.Д., Оксийук О.П., Жукинский В.Н., Стольберг Ф.В., Лаврик В.И. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: Наукова думка, 1990. 256 с.

16. Ejsmont-Karabin J., Karabin A. The suitability of zooplankton as lake ecosystem indicators: Crustacean trophic state index // *Polish Journal of Ecology.* 2013. V. 61. No. 3. P. 561–573.

17. Derevenskaya O.Yu., Unkovskaya E.N., Kosova M.V. Indices of zooplankton in assessing the ecological state of lake Ilinskoe (Russia) // *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication.* 2017. V. 7. P. 1787–1794. doi: 10.7456/1070DSE/161

References

1. Ivanova M.B. Study of the impact of abiotic environmental factors on the development of hydrobionts in lakes and the value of comparative limnological studies // *Production and hydrobiological studies of aquatic ecosystems: Collected papers.* Leningrad: Nauka, 1987. P. 35–44 (in Russian).

2. Andronikova I.N. Structural and functional organization of zooplankton of lake ecosystems of different trophic types. Sankt-Peterburg: Nauka, 1996. 189 p. (in Russian).

3. Alimov A.F., Bogatov V.V., Golubkov S.M. Production hydrobiology. Sankt-Peterburg: Nauka, 2013. 339 p. (in Russian).

4. Post D.M., Pace M.L., Hairston N.G.Jr. Ecosystem size determines food-chain length in lakes // *Nature.* 2000. V. 405. P. 1047–1049. doi: 10.1038/35016565

5. Gyllström M., Hansson L.-A., Jeppesen E., García Criado F., Gross E., Irvine K., Kairesalo T., Kornijów R., Miracle M.R., Nykänen M., Nöges T., Romo S., Stephen D., Van Donk E., Moss B. The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes // *Limnol.*

Oceanogr. 2005. V. 50. No. 6. P. 2008–2021. doi: 10.4319/lo.2005.50.6.2008

6. Alimov A.F. Biological diversity and the community structure of organisms // *Inland Water Biology.* 2010. V. 3. No. 3. P. 207–213. doi: 10.1134/S1995082910030016

7. Drago L., Panaïotis T., Irisson J.-O., Babin M., Biard T., Carlotti F., Coppola L., Guidi L., Hauss H., Karp-Boss L., Lombard F., McDonnell A.M.P., Picheral M., Rogge A., Waite A.M., Stemann L., Kiko R. Global distribution of zooplankton biomass estimated by *in situ* imaging and machine learning // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 894372. doi: 10.3389/fmars.2022.894372

8. Derevenskaya O.Yu., Mingazova N.M. Communities of zooplankton in lakes in the course of their contamination and restoration // *Hydrobiological journal.* 2000. V. 36. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1615/HydrobJ.v36.i1.10

9. Alprol A.E., Heneash A.M.M., Soliman A.M., Ashour M., Alsanie W.F., Gaber A., Mansour A.T. Assessment of water quality, eutrophication, and zooplankton community in lake Burullus, Egypt // *Diversity.* 2021. V. 13. No. 6. P. 268–275. doi: 10.3390/d13060268

10. Rosińska J., Kowalczywska-Madura K., Kozak A., Romanowicz-Brzozowska W., Goldyn R. Were there any changes in zooplankton communities due to the limitation of restoration treatments? // *Limnol. Rev.* 2021. V. 21. No. 2. P. 91–104. doi: 10.2478/limre-2021-0009

11. Derevenskaya O.Yu. Zooplankton of small shallow lakes after eco-rehabilitation activities // *Ecosystem Transformation.* 2022. V. 5. No. 2. P. 74–85 (in Russian). doi: 10.23859/estr-220207

12. Loskutova O.A., Kononova O.N. Zoobenthos and zooplankton of foothill lakes of the Subpolar Urals // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-056-062

13. Lakes of the Middle Volga Region / Eds. I.N. Sorokin, R.S. Petrova. Leningrad: Nauka, 1976. 236 p. (in Russian).

14. Guidelines for the collection and processing of materials in hydrobiological studies on freshwater bodies. Zooplankton and its products / Eds. G.G. Vinberg, G.M. Lavrenteva, Yu.A. Barulin. Leningrad: GosNIORKh, 1982. 33 p. (in Russian).

15. Romanenko V.D., Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N., Stolberg F.V., Lavrik V.I. Ecological assessment of the impact of hydrotechnical construction on water bodies. Kiev: Naukova dumka, 1990. 256 p. (in Russian).

16. Ejsmont-Karabin J., Karabin A. The suitability of zooplankton as lake ecosystem indicators: Crustacean trophic state index // *Polish Journal of Ecology.* 2013. V. 61. No. 3. P. 561–573.

17. Derevenskaya O.Yu., Unkovskaya E.N., Kosova M.V. Indices of zooplankton in assessing the ecological state of lake Ilinskoe (Russia) // *Turkish Online Journal of Design Art and Communication.* 2017. V. 7. P. 1787–1794. doi: 10.7456/1070DSE/161