

УДК 574.52

doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.521-537

## ЗООПЛАНКТОН ОЗЕР В УСЛОВИЯХ ЗАБОЛАЧИВАНИЯ И ЗАКИСЛЕНИЯ

О.Ю. Деревенская<sup>1</sup>, Е.Н. Унковская<sup>2</sup>, Н.М. Мингазова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

<sup>2</sup>Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник,  
пос. Садовый, Зеленодольский район, Республика Татарстан, 422537, Россия

### Аннотация

В статье приведены результаты исследований сообществ зоопланктона 14 озер-болот Среднего Поволжья (Россия). По степени закисления озера разделены на три группы: кислотные (рН 5–5.5), переходные (рН 5.6–6.5) и нейтральные (рН > 6.5).

Зоопланктон закисленных и незакисленных озер представлен обычными видами, широко распространенными в Среднем Поволжье, за исключением *Holopedium gibberum* Zaddach, 1855 и *Conochilus hippocrepis* (Schrank, 1803). Численность зоопланктона была одного порядка в кислотных и переходных озерах и примерно в три раза выше в нейтральных, причем из групп зоопланктона в кислотных и в нейтральных озерах преобладали коловратки, составляя до 80% от общей численности. Биомасса в кислотных и нейтральных озерах была невысокой, не превышала 1 г/м<sup>3</sup>.

В ходе исследований были выявлены изменения численности преобладающих групп зоопланктона в зависимости от рН: при переходе от кислотных озер к переходным коловратки *C. hippocrepis* сменили *C. unicornis* Rousset, 1892, возросла доля представителей родов *Kellicottia*, *Keratella*, *Ceriodaphnia*, появились *Postclausa hyptopus* (Ehrenberg, 1838), увеличилась доля рода *Eudiaptomus*. В нейтральных озерах еще больше возросла численность коловратки рода *Keratella*, а также родов *Asplanchna*, *Polyarthra*, *Trichocerca*, состав видов стал типичным для эвтрофных озер Среднего Поволжья. Видовое разнообразие зоопланктона увеличивалось от кислотных к нейтральным озерам.

**Ключевые слова:** зоопланктон, болото, закисление, заболачивание, структура, сообщество, биоиндикация, озеро

### Введение

Концентрация ионов водорода – важнейший фактор, определяющий возможность нормального функционирования водных организмов. В естественных условиях к закислению может приводить накопление в воде гуминовых кислот. Воздействие закисления на гидробионтов проявляется в нарушении процессов обмена веществ, осмотической регуляции, дыхания. На зоо- и фитопланктон закисление чаще влияет опосредовано через изменение доступности биогенных элементов, структуру трофической сети, продуктивности экосистем, изменение мест обитания и т. д. [1–5].

Трофический статус озер зависит от количества биогенных элементов, поступающих с территории водосбора, болота не являются исключением. При образо-

вании болот на бедных почвах их развитие может начаться с мезотрофной или олиготрофной стадии и продолжаться до эвтрофной. По мере перехода торфяника на атмосферное питание торфяное болото, наоборот, эволюционирует от эвтрофной к олиготрофной стадии [4].

Процессы болотообразования получают широкое распространение в зонах избыточного увлажнения. В Среднем Поволжье такие условия, характерны для лесной зоны Низменного Заволжья, где к заболачиванию приводит избыточное увлажнение, возникающее вследствие преобладания количества выпавших осадков над испарившимися [6]. Заболоченные водоемы встречаются и на территории Вятско-Камской возвышенности, где они занимают пониженные участки в долинах рек. Степень заболачивания неодинакова для различных озер: от заболоченной территории водосбора до верховых болот. Крайним случаем является образование небольшого открытого «окна» воды в сплавине торфяного болота.

Специфичные для болот гидрологические условия, физико-химические показатели среды и особенности протекания продукционно-деструкционных процессов неизбежно оказывают влияние на структурные характеристики сообществ зоопланктона [1, 3, 4] – закисление, низкая прозрачность, а часто и невысокое содержание кислорода в воде создают неблагоприятные условия для развития гидробионтов.

Цель настоящей работы – выявление особенностей структуры сообществ зоопланктона в условиях природного заболачивания и закисления.

### Материалы и методы

Исследовано 14 озер-болот, расположенных в западной части Среднего Поволжья, в провинциях Низменного Заволжья и Вятско-Камской возвышенности, в пределах лесной зоны. Озера Моховое, Долгое, Гнилое, Казанское находятся на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника, озера Кошаер и Изьер – в Государственном природном заповеднике «Большая Кокшага» и его охранной зоне, остальные озера – на территории Республики Марий Эл.

Исследованные водоемы относятся к малым лесным озерам, имеют небольшую площадь (от 2.1 до 82 га), глубины от 2.5 до 23 м (табл. 1). Озера имеют карстовое происхождение, иногда суффозионное. Для глубоководных озер в летнее время характерна стратификация воды по температуре. Антропогенное воздействие на большинство из исследованных лесных озер не оказывается или оно минимально.

Пробы зоопланктона отбирали в середине вегетационного периода (в июне – августе). В это время абиотические условия наиболее стабильны и развитие планктона зависит в основном от трофических условий в водоеме, а сообщества зоопланктона наиболее разнообразны и обильны [7]. На озерах-болотах Моховое, Долгое, Гнилое выполнены многолетние наблюдения (в течение 12–19 лет), на оз. Кошаер – в течение 3 лет, на остальных озерах – однократно. Пробы отбирали из оз. Кошаер в 1996–1998 гг., из оз. Долгое в 1998–2016 гг., из оз. Гнилое в 1998–2016 гг., из оз. Моховое 2002–2016 гг., из оз. Казанское в 2005 г., из озер Бойня, Сайвер, Серебряное в 2001 г., из оз. Изьер в 1997 г., из оз. Щучье в 1998 г., из оз. Лесная сказка в 2000 г., из озер Топ-яр, Б. Касьяр и Бакшаньер в 2004 г.

Табл. 1

Географические координаты и морфометрические характеристики исследованных озер

Озеро	Координаты центральной точки	Происхождение	Площадь, га	Глубина максимальная, м	Глубина средняя, м	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	Характер водообмена
Кошаер	56°39'27.66" с.ш.; 47°18'18.89" в.д.	Карстовое	2.1	19.0	9.9	209.7	Бессточное
Изиер	56°35'43.13" с.ш.; 47°19'51.94" в.д.	Карстовое	3.8	6.0	3.9	152.5	Бессточное
Сайвер	56°16'10.87" с.ш.; 48°16'5.29" в.д.	Карстовое	10.7	14.3	6.6	703.0	Приточное
Серебряное	56°23'21.06" с.ш.; 48°21'56.84" в.д.	Карстовое	28.5	11.0	5.0	1423.0	Бессточное
Лесная сказка	56°25'22.68" с.ш.; 48° 4'36.30" в.д.	Карстовое	12.7	16.7	5.3	674.0	Приточное
Щучье	56°26'42.51" с.ш.; 47°44'47.16" в.д.	Междунное	24.0	2.5	1.2	277.0	Бессточное
Топ-яр	56°34'12.58" с.ш.; 47°8'50.68" в.д.	Карстовое	2	–	–	–	Бессточное
Бакшаньер*	56°29'23.67" с.ш.; 47°2'19.37" в.д.	Карстовое	82.0	23	3.7	3067.5	Бессточное
Бойня	56°20'46.18" с.ш.; 48°18'5.91" в.д.	Карстовое	2.5	–	–	–	Проточное
Б. Касьяр*	56°29'44.93" с.ш.; 46°54'28.36" в.д.	Карстовое	16.0	3.3	2.1	162.8	Сточное
Гнилое	55°55'4.58" с.ш.; 48°46'40.73" в.д.	Карстовое	8.0	4.9	3.3	27.5	Бессточное
Долгое	55°54'0.02" с.ш.; 48°49'15.66" в.д.	Карстовое	2.6	12.5	3.8	10.0	Бессточное
Моховое	55°54'37.12" с.ш.; 48°51'39.51" в.д.	Карстовое	8.6	6.7	2.4	21.1	Бессточное
Казанское болото	55°54'6.12" с.ш.; 48°46'30.66" в.д.	Карстовое	–	2.5	–	–	Бессточное

\* По литературным данным [6].

Из глубоководных озер (Кошаер, Долгое, Сайвер, Серебряное, Лесная сказка, Бакшаньер) пробы отбирали путем последовательного облавливания сетью Джели (размер ячеи – 100 мкм) слоев воды, выделенных в соответствии со стратификацией воды по температуре. Из озер Гнилое и Моховое пробы отбирали либо послойно, либо облавливанием всего столба воды от дна до поверхности сетью Джели. На озерах Щучье, Топ-яр, Бойня, Изиер, Большой Касьяр, Казанское пробы отбирали в прибрежной зоне процеживанием 50 л воды через сеть Апштейна.

Камеральная обработка включала определение видового состава зоопланктона, расчет численности и биомассы. Работы выполнены в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками [8]. Всего за период исследований было отобрано и обработано 110 количественных проб зоопланктона.

Изменение структуры сообществ зоопланктона по градиенту рН оценивали по индексу Е/О (отношение эвтрофных видов к олиготрофным) [9], изменению средней индивидуальной массы зоопланктона (*w*, мг), численности и биомассы зоопланктона, долей таксономических групп зоопланктона в образовании численности и биомассы [10, 11], индексу Симпсона [12] (по численности и биомассе).

Степень разнообразия зоопланктона оценивали по индексу Шеннона ( $H$ ) (по численности и биомассе) [13]. Индекс сапробности ( $S$ ) рассчитывали по методу Пантле и Букка в модификации Сладечека [14].

Параллельно с отбором проб зоопланктона отбирали пробы воды для химического анализа из поверхностных и придонных слоев при помощи батометра Молчанова ГР-18 (в глубоководных озерах) либо зачерпыванием воды с поверхности (в мелководных). Анализ проб выполнен по общепринятым в гидрохимическом анализе методикам [15–17].

Трофический статус озер оценивался по индексу трофического состояния (TSI), рассчитанному по величине прозрачности [18].

Статистическая обработка данных выполнена в MS Excel и включала расчет средних значений, ошибки средней.

### Результаты исследований

Летние значения рН исследованных нами озер-болот изменялись на поверхности от 5.0 до 7.8, а в придонных слоях воды – от 5.0 до 7.9. По величине средних значений рН озера можно разделить на три группы: кислотные с величинами рН 5.0–5.5 (Бакшаньер, Бойня, Топ-яр), переходные – от 5.6 до 6.5 (Кошаер, Изьер, Сайвер, Серебряное, Лесная сказка, Щучье) и нейтральные – > 6.5 (Б. Касьяр, Долгое, Моховое, Гнилое, Казанское) (табл. 2).

Состав главных ионов в озерах не одинаков. Из анионов преобладали гидрокарбонаты либо сульфаты, а из катионов – кальций или  $\text{Na} + \text{K}$ . По преобладающим ионам озера можно разделить на две группы: гидрокарбонатно-кальциевые (Топ-яр, Изьер, Кошаер, Долгое, Гнилое, Моховое) и сульфатно-натриево-калиевые (Бакшаньер, Бойня, Сайвер, Серебряное, Лесная сказка, Б. Касьяр, Щучье). Ранее отмечалось, что многие ацидотрофные озера имеют сульфатный класс вод, а не гидрокарбонатный. Это связывают с тем, что при рН воды > 5.3 в присутствии анионов сильных минеральных кислот в воде кислотных озер разрушаются гидрокарбонаты, что приводит к резкому снижению содержания неорганического углерода [4, 19].

Содержание минерального азота ( $N_{\text{мин}}$ ) в озерах было невысоко (от 0.25 до 1.64 мг/дм<sup>3</sup> в поверхностных слоях воды). В озерах Кошаер, Топ-яр, Изьер, Бакшаньер, Б. Касьяр, Щучье, Лесная сказка, Долгое, Моховое и Гнилое преобладал азот нитратов, в озерах Бойня, Сайвер, Серебряное – аммонийный азот. Преобладание аммонийного азота над нитратным часто наблюдается в водоемах, питающихся водами с высоким содержанием растворенного органического вещества [20], а также в антропогенно закисленных озерах [4]. В придонных слоях воды концентрации биогенных элементов существенно выше. Концентрация нитритов в большинстве озер близка к аналитическому нулю. В оз. Бойня было обнаружено более высокое содержание ортофосфатов (0.3 мг/дм<sup>3</sup>), в остальных озерах количество ортофосфатов варьировалось от < 0.01 до 0.07 мг/дм<sup>3</sup>.

О преобладании в воде озер Бойня, Сайвер, Серебряное, Гнилое стойкого аллохтонного органического вещества свидетельствовали низкие значения показателя БПК<sub>5</sub>/ПО [16], которые изменялись в диапазоне 0.06–0.13. В оз. Долгое это отношение (по данным 2002 г.) составляло 0.64, что может указывать на высокое содержание автохтонного планктоногенного органического вещества.

Табл. 2

Физико-химические показатели озер-болот (поверхностный слой)

Показатель	Бак-шаньер	Топ-яр	Бойня	Кошар (n = 3)	Сайвер	Серебряное	Лесная есазка	Изьер	Щучье	Б. Касьяр	Долгое (n = 19)	Гнилое (n = 19)	Моховое (n = 12)	Казанское болото
Прозрачность, м	0.35	0.70	0.70	3.67 ± 0.44	2.70	2.80	2.50	1.10	0.40	0.60	0.94 ± 0.07	0.45 ± 0.03	0.78 ± 0.06	0.60
TSS	75.15	65.15	65.15	41.46 ± 1.70	45.67	45.15	46.78	58.62	73.22	67.37	61.60 ± 1.07	71.88 ± 0.79	63.89 ± 1.08	67.37
pH, ед.	5.0	5.5	5.2	6.0 ± 0.5	6.5	6.5	6.3	6.0	6.5	6.8	6.9 ± 0.1	6.6 ± 0.1	7.2 ± 0.07	6.7
O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	9.9	4.2	4.2	14.4 ± 2.6	5.6	7.8	9.9	17.0	—	—	8.3 ± 0.4	7.4 ± 0.5	5.5 ± 0.6	3.9
O <sub>3</sub> , %	93	—	—	170.0 ± 30.0	66	92	114	200.0	102.0	—	101.2 ± 4.8	88.9 ± 7.2	66.4 ± 7.5	45.3
XПК, мгО/дм <sup>3</sup>	60.7	5.3	—	—	—	—	—	—	—	15.8	35.9 ± 1.7	69.0 ± 2.9	38.9 ± 2.8	68.0
БПК <sub>5</sub> , мгО/дм <sup>3</sup>	—	—	2.07	—	0.71	0.65	—	—	—	—	4.43 ± 0.45	4.14 ± 0.63	3.85 ± 0.37	1.30
ПО, мгО/дм <sup>3</sup>	18.2	2.5	28.0	7.4 ± 1.3	6.7	9.9	23.2	14.2	15.4	6.8	12.7*	33.8*	—	—
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	9.9	5.7	2.4	2.9 ± 1.1	2.9	4.3	4.7	4.5	2.9	9.9	3.9 ± 1.1	4.4 ± 0.9	23.7 ± 2.4	1.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	57.4	31.2	99.2	3.0 ± 0.6	90.1	92.0	212.0	2.0	30.0	57.2	5.9 ± 1.1	4.0 ± 1.0	0.8 ± 0.5	2.6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	42.7	73.2	3.1	5.1 ± 0.5	6.6	6.6	20.8	8.90	2.10	67.10	14.24 ± 2.78	12.93 ± 1.35	101.52 ± 14.48	29.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.86	0.67	1.39	0.14 ± 0.07	0.30	0.34	0.84	0.21	0.68	0.9	0.45 ± 0.09	0.59 ± 0.13	0.31 ± 0.05	0.38
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.010	0.020 ± 0.002	0.033 ± 0.004	0.020 ± 0.002	0.071
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	3.90	2.20	0.26	9.15 ± 4.99	0.09	0.14	1.07	0.90	4.90	2.30	0.75 ± 0.25	0.90 ± 0.31	0.85 ± 0.39	< 0.1
N <sub>амп</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	1.55	1.02	1.14	2.18 ± 1.13	0.25	0.30	0.89	0.37	1.64	1.22	0.53 ± 0.08	0.68 ± 0.12	0.44 ± 0.08	0.34
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.01	0.02	0.30	< 0.01	0.05	0.04	0.05	< 0.01	< 0.01	0.07	0.060 ± 0.004	0.058 ± 0.004	0.06 ± 0.01	0.11
Na+K, мг/дм <sup>3</sup>	—	—	35.0	2.25 ± 0.75	49.5	47.7	—	1.2	15.9	—	—	—	—	—
Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	16.0	20.0	1.6	2.5 ± 0.5	—	4.0	3.9	3.30	2.00	18.00	6.09 ± 2.14	4.47 ± 0.41	25.66 ± 1.61	9.90
Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.6	0.6	0.6	0.5 ± 0.2	—	0.5	3.0	0.70	0.60	0.60	1.88 ± 0.65	1.92 ± 0.43	5.48 ± 0.67	2.50
Минерализация, мг/мд <sup>3</sup>	159.74	154.77	—	22.95 ± 5.32	171.00	155.00	—	—	—	193.34	—	—	—	45.60
Уд. электропроводность мкС/см,	—	60	24	20	25	31	34	24	22	50	86	33	203	—
Тип воды	SO <sub>4</sub> Na+K	HCO <sub>3</sub> Ca	SO <sub>4</sub> Na+K	HCO <sub>3</sub> Ca	SO <sub>4</sub> Na+K	SO <sub>4</sub> Na+K	SO <sub>4</sub> Na+K	HCO <sub>3</sub> Ca	SO <sub>4</sub> Na+K	SO <sub>4</sub> Na+K	HCO <sub>3</sub> Ca	HCO <sub>3</sub> Ca	HCO <sub>3</sub> Ca	HCO <sub>3</sub> Ca
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	79	75	—	—	—	—	—	—	—	92.00	77.26 ± 13.59	109.08 ± 16.31	216.10 ± 15.63	—

Примечание: n – количество обработанных гидрохимических проб (если не указано, то приведены результаты однократных исследований); ПО – перманганатная окисляемость; \* – данные 2002 г.

В придонных слоях воды большинства озер наблюдалась низкая концентрация растворенного кислорода либо он отсутствовал и вместо него присутствовал сероводород.

Озера имеют разный трофический статус. Величина TSI изменялась от 45.15 до 73.22. К мезотрофным по этому показателю (TSI от 40 до 60) относились озера Кошаер, Изьер, Сайвер, Серебряное, Лесная сказка, а к эвтрофным (TSI от 60 до 80) – Бакшаньер, Бойня, Топ-яр, Б. Касьяр, Щучье, Долгое, Гнилое, Моховое. Минимальное значение отмечено в оз. Кошаер (41.46), максимальное – в оз. Бакшаньер (75.15).

На формирование гидрохимического состава болотных вод существенное влияние может оказать тип гидрологического режима, характерный для данных озер. Разница в преобладающих источниках питания исследованных озер может объяснить достаточно большой диапазон величин минерализации, различный ионный состав воды, а в некоторых случаях и более высокое содержание биогенных элементов.

В зоопланктоне исследованных озер было выявлено 103 вида, из них коловраток – 54 (52%), ветвистоусых ракообразных – 31 (30%), веслоногих – 18 (18%). Видовое богатство относительно высокое, хотя в каждом отдельно взятом озере, где были проведены многолетние исследования летнего зоопланктона, зарегистрировано от 31 до 61 вида. В целом фауна заболоченных водоемов представлена видами довольно широко распространенными, обитающими в широком диапазоне pH воды, гумификации и трофности. Исключение составляют рачки *Holopedium gibberum* Zaddach, 1855 и коловратки *Conochilus hippocrepis* (Schrank, 1803), которые были встречены в немногих из исследованных нами озерах Нижнего Заволжья. Озера, в которых были обнаружены эти виды, заболочиваемые, светловодные и с низкой минерализацией воды. *H. gibberum* распространен в основном в северной части Европейской России, где предпочитает обитать в сходных условиях [21]. Число видов зоопланктона, приходящихся на одну пробу, по группам озер различалось мало, было наиболее высоко в нейтральных озерах –  $14.51 \pm 0.71$ , а в кислых и переходных составляло  $13.5 \pm 0.5$  и  $12.78 \pm 1.28$  соответственно. Значения несколько выше, чем установлено в ходе исследований закисленных водоемах Верхней Волги, где число видов в пробе составляло 8–10 [4].

Наиболее часто встречаемыми видами зоопланктона в исследованных озерах всех трех групп, выделенных по величине pH воды, были *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850 (в 86% озер), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851) (в 76%), *Bosmina* (*B.*) *longirostris* (O.F. Muller, 1785), *Ceriodaphnia quadrangula* (O.F. Muller, 1785), *Diaphanosoma brachyurum* (Lieven, 1848) (в 64%), *Chydorus sphaericus* (O.F. Muller, 1785), *Polyarthra vulgaris* Carlin, 1943 (в 57%), *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Keratella quadrata* (O.F. Muller, 1786), *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888) (в 50%), *Filinia longiseta* (Ehrenberg, 1834), *H. gibberum* (в 44%), *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879) (в 43%).

Анализ частоты доминирования видов зоопланктона по численности показал, что в кислом оз. Бойня (pH 5.2) доминировали крупные ветвистоусые ракообразные *Polyphemus pediculus* (Linnaeus, 1761), *Simocephalus vetulus* (O.F. Muller, 1776), *D. brachyurum*, *H. gibberum*. В кислом оз. Топ-яр при pH 5.5 отмечено доминирование *C. hippocrepis*. В оз. Бакшаньер (pH 5), так же как и во многих переходных

озерах, наиболее часто доминировали *K. longispina*, *A. priodonta*, *Postclausa hyptopus* (Ehrenberg, 1838), *C. quadrangula*. В нейтральных озерах в составе доминирующего комплекса были *K. cochlearis*, *A. priodonta*, *K. quadrata*, *P. vulgaris*, *T. cylindrica*, *P. hyptopus*, *Polyarthra major* Burckhard, 1900 – коловратки, являющиеся индикаторами высокого уровня трофности. По своему трофическому статусу озера также соответствуют эвтрофным.

По биомассе в кислотных и переходных озерах наиболее часто доминировали ракообразные *P. pediculus*, *Daphnia (D.) longispina* O.F. Muller, 1785, *Eudiaptomus vulgaris* (Schmeil, 1898), *C. quadrangula*, в нейтральных была велика доля коловраток *P. vulgaris*, *A. priodonta*, род *Trichocerca*, а также ветвистоусых ракообразных *B. longirostris*, веслоногих *Thermocyclops crassus* (Fischer, 1853). В кислотных и переходных озерах иногда наблюдалось доминирование одного-двух видов зоопланктона. Так, в оз. Бойня рачок *P. pediculus* составлял 87% от общей биомассы зоопланктона. По численности почти поровну были представлены *D. brachiurum* и *P. pediculus*. В оз. Топ-яр 90% от численности составляли *C. hippocrepis*. В оз. Кошаер обычно доминировал один или два вида – *K. longispina* или *P. pediculus* либо *K. longispina* и *Conochilus unicirnis* Rousset, 1892, по биомассе – *P. pediculus* или *E. graciloides*. В оз. Сайвер – *D. longispina*, в оз. Серебряное – *C. quadrangula*, в оз. Щучье – *A. priodonta*.

При переходе от кислотных к нейтральным озерам наблюдалась смена таксономических групп, образующих суммарно 80–100% численности зоопланктона.

Из коловраток в кислотных озерах были многочисленны такие виды, как *C. hippocrepis* (иногда составляли более 80% от общей численности), коловратки родов *Asplanchna* (7.7%), *Polyarthra* (4.7%), а также ювенильные стадии циклопов (18.7%). В переходных озерах по численности преобладали представители родов *Kellicottia* (14.5%), *Keratella* (9.9%), *Ceriodaphnia* (14%), ювенильные стадии циклопов (19.5%), *P. hyptopus* (16%), в нейтральных – представители родов *Keratella* (35.5%), *Asplanchna* (13.4%), *Polyarthra* (11.4%), ювенильные стадии циклопов (15.6%), *P. hyptopus*.

Ракообразные в кислотных озерах были представлены по-разному. В оз. Бакшаньер они составляли доли процента от общей численности. В оз. Бойня микродетритофаги *D. brachiurum* оставляли 40%, а хищные *P. pediculus* – 32%. В нейтральных озерах на долю рачков-фильтраторов приходилось около 16%. Сходные результаты были получены при исследовании зоопланктона озер-болот Верхней Волги [4]: в кислотных озерах были многочисленны микродетритофаги (*D. brachiurum*, *C. quadrangula*) и грубые фильтраторы-фитофаги *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888).

По биомассе в кислотных озерах коловратки рода *Asplanchna* составляли 11.9%, *Diaphanosoma* – 6.7%, ювенильные стадии циклопов – 6%, в оз. Бойня доля *P. pediculus* достигала 89%. В переходных озерах ветвистоусые рачки рода *Ceriodaphnia* составляли 19.2%, рода *Daphnia* – 8.3%, веслоногие рода *Eudiaptomus* – 15.9%, ювенильные стадии циклопов – 6.3%. В нейтральных озерах коловратки рода *Asplanchna* составляли 67%, р. *Trichocerca* – 6.6%, веслоногие рода *Thermocyclops* – 9.4%, ювенильные стадии циклопов – 9.2%.

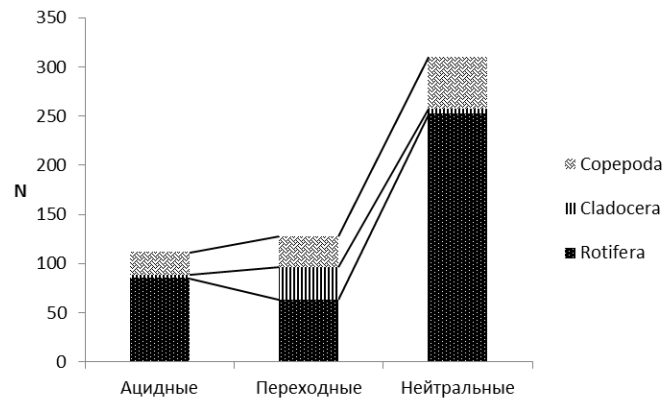


Рис. 1. Численность ( $N$ , тыс. экз./м<sup>3</sup>) зоопланктона различных таксономических групп в озерах различного типа

В ацидных озерах «мирный» зоопланктон составлял 91% от численности, хищники были представлены *P. pediculus*, циклопами различных стадий, коловратками рода *Asplanchna*, всего 8.8%. В переходных озерах «мирный» зоопланктон составлял 95% от общей численности, хищный также был представлен *P. pediculus*, циклопами и коловратками рода *Asplanchna*, но в меньшем количестве, всего 4.9%. В нейтральных озерах «мирный» зоопланктон составлял 86.5%. Хищные ракообразные составляли менее 1%, были представлены *Leptodora kindtii* (Focke, 1844) (в оз. Долгое), циклопами, хищными коловратками рода *Asplanchna*, всего 13.5%.

Таким образом, в ацидных озерах микродетритофаги и грубые фильтраторы составляли 14%, в переходных – микродетритофаги – 31%, в нейтральных – микродетритофаги и грубые фильтраторы – 21%.

Численность зоопланктона была одного порядка в ацидных и переходных ( $111.33 \pm 80.09$  и  $127.36 \pm 34.40$  тыс. экз./м<sup>3</sup> соответственно) и существенно выше в нейтральных ( $309.66 \pm 53.99$  тыс. экз./м<sup>3</sup>) (рис. 1). Из групп зоопланктона в озерах преобладали коловратки, их доля от общей численности в ацидных мезотрофных и в нейтральных эвтрофных озерах составляла 70–80%, в переходных – около 50%, причем в ацидных озерах преобладали коловратки *K. longispina* или *C. hippocrepis*, а в нейтральных – представители родов *Keratella*, *Asplanchna*.

В ацидных и нейтральных озерах биомасса зоопланктона была низкой –  $0.88 \pm 0.47$  и  $0.89 \pm 0.31$  г/м<sup>3</sup> соответственно (рис. 2). Из групп зоопланктона в переходных озерах преобладали ветвистоусые ракообразные, а в ацидных и нейтральных – коловратки.

Соотношение основных таксономических групп зоопланктона в сообществах озер различного типа обуславливает и величины индексов, основанных на структурных показателях зоопланктона (табл. 3). Наибольшая индивидуальная масса ( $w$ ) зоопланктона была зафиксирована в ацидных озерах, в переходных и нейтральных индивидуальная масса уменьшается, что отражает преобладание в сообществе мелких видов зоопланктона.



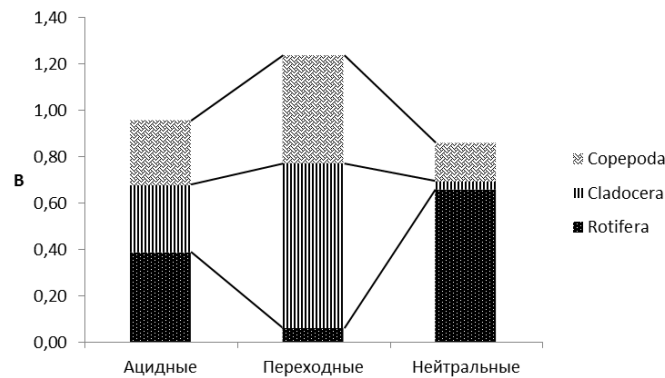


Рис. 2. Биомасса ( $B$ , г/м<sup>3</sup>) таксономических групп зоопланктона разнотипных озер

Табл. 3

Структурные показатели сообществ зоопланктона озер-болот

Индекс	Ацидные	Переходные	Нейтральные
$w$ , мг	$0.0650 \pm 0.0610$	$0.0138 \pm 0.0043$	$0.0028 \pm 0.0003$
Rotifera ( $N$ , %)	$66.63 \pm 22.13$	$49.41 \pm 10.77$	$80.83 \pm 1.99$
Cladocera ( $N$ , %)	$21.33 \pm 21.2$	$27.33 \pm 7.33$	$1.36 \pm 0.26$
Copepoda ( $N$ , %)	$12.03 \pm 4.67$	$23.24 \pm 6.35$	$17.8 \pm 1.87$
$N$ , тыс. экз./м <sup>3</sup>	$111.33 \pm 80.09$	$127.36 \pm 34.40$	$309.66 \pm 53.99$
Rotifera ( $B$ , %)	$35.20 \pm 28.40$	$16.06 \pm 9.24$	$71.89 \pm 3.38$
Cladocera ( $B$ , %)	$33.36 \pm 33.03$	$47.84 \pm 9.39$	$4.46 \pm 1.20$
Copepoda ( $B$ , %)	$31.43 \pm 26.07$	$36.04 \pm 9.09$	$23.45 \pm 2.91$
$B$ , г/м <sup>3</sup>	$0.88 \pm 0.47$	$1.24 \pm 0.41$	$0.89 \pm 0.31$
Индекс сапробности	$1.29 \pm 0.05$	$1.43 \pm 0.04$	$1.53 \pm 0.02$
Индекс Шеннона (по численности)	$1.76 \pm 0.54$	$1.95 \pm 0.20$	$2.23 \pm 0.10$
Индекс Шеннона (по биомассе)	$1.27 \pm 0.48$	$1.64 \pm 0.19$	$1.74 \pm 0.11$
Индекс Симпсона (по численности)	$0.54 \pm 0.18$	$0.62 \pm 0.06$	$0.67 \pm 0.03$
Индекс Симпсона (по биомассе)	$0.41 \pm 0.16$	$0.55 \pm 0.05$	$0.54 \pm 0.03$
Е/О	$1.33 \pm 0.33$	$1.99 \pm 0.69$	$5.42 \pm 0.22$

Значение индекса сапробности увеличивается от кислотных озер к переходным и нейтральным. Наиболее низкие значения отмечены в кислотных озерах. По величине индекса кислотные и переходные озера относились к олигосапробным, а нейтральные – к  $\beta$ -мезосапробным.

Индекс видового разнообразия увеличивается от кислотных озер к нейтральным как по численности, так и по биомассе, отражая увеличение биоразнообразия и выравнивания сообществ. В закисленных водах доминирует, как правило, небольшое число видов, остальные представлены малым числом, что приводит к снижению индексов видового разнообразия и доминирования. Аналогично изменялись и значения индекса доминирования Симпсона. По соотношению числа видов эвтрофных к олиготрофным (Е/О) кислотные и переходные озера являются олиготрофными, а нейтральные – эвтрофными.

### Обсуждение результатов

В целом фауна зоопланктона закисленных и незакисленных озер представлена обычными видами, широко распространенными в озерах Среднего Поволжья, за исключением *H. gibberum* и *C. hippocrepis*. Сходство видового состава закисленных и нейтральных озер наблюдали и другие исследователи, отмечая, что в зоопланктоне закисленных озер очень мало специфических для этих условий видов, но происходит изменение соотношения обилия уже существующих [22–24]. Часто также указывалось на отсутствие или редкую встречаемость крупных планктонных хищников родов *Leptodora*, *Bithotrephes* и *Heterocopa* в озерах с  $\text{pH} < 5-6$  [4, 23]. В наших исследованиях из трех озер с  $\text{pH} < 5.6$  крупные планктонные хищники были встречены только в одном озере.

Воздействие факторов окружающей среды проявляется и в изменении состава видов-доминантов. В закисленных водоемах отмечалось доминирование крупных ракообразных [4], но в наших исследованиях они доминировали только в одном из закисленных озер – в оз. Бойня ( $\text{pH} 5.2$ ), в других же кислотных озерах доминировали коловратки. Сообщества зоопланктона с доминантами *K. longispina* и *C. hippocrepis* также отмечались в закисленных озерах Карелии, но в более южных заболоченных водоемах Дарвиновского заповедника эти виды были многочисленными только в озерах с  $\text{pH}$  воды  $> 6.5$  [21]. Эти виды доминировали в исследованных нами кислотных озерах. Вероятно, одной из возможных причин снижения численности крупных ракообразных может быть пресс со стороны ихтиофауны. Важную роль хищников в формировании сообществ зоопланктона закисленных озер отмечают многие исследователи [25–28]. По мнению некоторых из них [24], рыбы и хищные беспозвоночные, влияние которых наблюдается в широком диапазоне значений  $\text{pH}$ , могут играть даже большую роль в этом процессе, чем физиологические ограничения, обусловленные низкими значениями  $\text{pH}$  [24].

Число видов-доминантов в озерах изменялось от 1 до 5, но обычно было невысоким. Преобладание немногих видов, сменяющих друг друга в течение сезона, ранее отмечалось в закисленных и переходных озерах исследователями заболоченных водоемов северо-запада России. Наблюдалось формирование моно- или бидоминантных сообществ, в которых 1–2 вида образовывали основную часть численности и биомассы, а остальные таксоны становились малочисленными и не улавливались стандартными методами сбора [4, 10, 22, 23, 29].

В ходе наших исследований выявлены следующие изменения численности преобладающих групп зоопланктона в зависимости от  $\text{pH}$ : в направлении от кислотных к переходным озерам коловратки *C. hippocrepis* заменялись *C. unicornis*, возрастала доля видов родов *Kellicottia*, *Keratella*, *Ceriodaphnia*, появлялись *P. hyptopus*, увеличивалась доля представителей рода *Eudiaptomus*. В нейтральных озерах становилось еще больше представителей рода *Keratella*, а также родов *Asplanchna*, *Polyarthra*, *Trichocerca*, и видовой состав становился типичным для эвтрофных озер [4, 7, 10, 11].

В кислотных озерах наблюдалась большая доля *P. pediculus* в общей биомассе хищных рачков, которая сильно снижалась в переходных и особенно в нейтральных озерах, уступая лидирующие позиции хищными коловратками рода *Asplanchna*. В кислотных озерах была велика доля микродетритофагов рода *Diaphanosoma*, которая снижалась в переходных озерах, в которых доминировали

представители родов *Daphnia* и *Ceriodaphnia*. В переходных озерах по сравнению с кислотными возросла доля грубых фильтраторов рода *Eudiaptomus*, которых в нейтральных замещали рачки рода *Thermocyclops* и их ювенильные стадии.

В кислотных озерах бассейна Рыбинского водохранилища (Вологодская обл.) было выявлено сходное изменение обилия видов зоопланктона в зависимости от pH: снижалась относительная биомасса *A. priodonta*, *Daphnia (D.) cristata* Sars, 1862, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *M. leuckarti* и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863) и возросла доля в планктоне *E. graciloides*, *D. brachyurum*, *C. quadrangula*, *Bosmina obtusirostris* и *H. gibberum* по сравнению с нейтральными водоемами [4].

В кислотных и переходных озерах процент «мирных» видов более высок (91–95% от общей численности), чем в нейтральных (68%). В этих озерах хищники были представлены *P. pediculus*, циклопами, коловратками рода *Asplanchna*, в нейтральных – *L. kindtii*, циклопами, коловратками рода *Asplanchna*.

Численность зоопланктона была наиболее высокой в нейтральных озерах и почти в 3 раза ниже в кислотных. Снижение численности зоопланктона в кислотных озерах по сравнению с нейтральными отмечали и другие исследователи. Численность зоопланктона была в несколько раз ниже из-за слабого развития коловраток в кислотных озерах Дарвиновского заповедника, тогда как в нейтральных озерах численность коловраток достигала 71% от общей численности [4]. В наших исследованиях, при общей невысокой численности зоопланктона относительная численность коловраток в кислотных озерах была высока. Низкие количественные показатели коловраток выявлены только в одном из кислотных озер – оз. Бойня (pH 5.2).

Значения биомассы зоопланктона были наиболее высокими в переходных озерах ( $1.24 \pm 0.41$  г/м<sup>3</sup>) и снижались в кислотных и нейтральных. Относительно изменения биомассы зоопланктона при закислении в литературных источниках нет единого мнения. Так, в закисленных водоемах Верхней Волги биомасса зоопланктона была более высокой в кислотных озерах по сравнению с нейтральными из-за доминирования в сообществе ракообразных [22]. Но в других работах [24, 25, 30] отмечается, что количество зоопланктона определяется преимущественно трофическим статусом водоема и прессом хищников, а также природой закисления вод и в меньшей степени величинами pH.

Ранее было установлено, что преобладание той или иной группы зоопланктона обуславливается также причиной закисления. Так, для заболоченных озер Верхней Волги выявлено, что в случае естественного закисления водами болот наблюдается отсутствие организмов >20 мкг (взрослые клadoцеры, каляниды), доминируют формы массой 1–4 мкг (мелкие коловратки) и 10–20 мкг (*Asplanchna* и молодь циклопов) [4]. Сходные результаты мы получили и в наших исследованиях.

В кислотных озерах происходит снижение видового разнообразия и плотности доминирующих видов как отклик экосистемы на ухудшение условий. Наиболее приспособленные виды имеют более высокую численность, остальные представлены малым числом особей и их учет стандартными методами сбора представляет значительную трудность. Значение индекса видового разнообразия растет от кислотных озер к нейтральным как по численности, так и по биомассе зоопланктона, что подтверждают имеющиеся литературные данные по этому вопросу [4, 10].

### Заключение

В зоопланктоне озер с различной степенью закисления и заболачивания было выявлено 103 вида, из них коловраток – 54 (52%), ветвистоусых ракообразных – 31 (30%), веслоногих – 18 (18%). Большинство этих видов – характерные обитатели озер Среднего Поволжья, за исключением ветвистоусых рачков *Holopedium gibberum* Zaddach, 1855 и коловраток *Conochilus hippocrepis* (Schrank, 1803), которые редко встречаются в озерах исследуемого региона.

Численность зоопланктона была одного порядка в кислотных и переходных озерах и примерно в три раза выше в нейтральных озерах. Причем в кислотных мезотрофных и нейтральных эвтрофных озерах преобладали коловратки, составляя до 80% от численности. Биомасса зоопланктона в кислотных и нейтральных озерах была низкой, не превышала 1 г/м<sup>3</sup>.

В ходе исследований были выявлены следующие изменения численности преобладающих групп зоопланктона в зависимости от pH воды: от кислотных озер к переходным коловратки *C. hippocrepis* заменялись *C. unicornis*, возрастала доля представителей родов *Kellicottia*, *Keratella*, *Ceriodaphnia*, появлялись *P. hyptopus*, а также становилось больше представителей рода *Eudiaptomus*. В нейтральных озерах еще больше возрастала доля рода *Keratella* и родов *Asplanchna*, *Polyarthra*, *Trichocerca*, состав видов становился типичным для эвтрофных озер Среднего Поволжья [31]. Хищный зоопланктон по биомассе преобладал в кислотных озерах за счет высокой доли ветвистоусых и веслоногих рачков. В нейтральных озерах доля хищного зоопланктона также была высока, но за счет преобладания хищных коловраток. В кислотных озерах была велика доля микродетритофагов рода *Diaphanosoma* (по биомассе), которая снижалась в переходных озерах и заменялась родами *Daphnia* и *Ceriodaphnia*. В переходных озерах по сравнению с кислотными возрастает количество грубых фильтраторов рода *Eudiaptomus*, которых в нейтральных озерах замещают рачки рода *Thermocyclops* и их ювенильные стадии.

Значение индекса видового разнообразия росло от кислотных озер к нейтральным и по численности, и по биомассе, отражая увеличение биоразнообразия и выравнивания сообществ. Аналогично изменялись и значения индекса доминирования Симпсона.

Показатели индекса сапробности увеличивались от кислотных озер к переходным и нейтральным. Наиболее низкие его значения характерны для кислотных озер. По величине индекса сапробности кислотные и переходные озера относились к олигосапробным, а нейтральные – к β-мезосапробным.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность инженеру ЛОВЭ КФУ Л.Р. Павловой, начальнику ЛЭИМОС Института проблем экологии и недропользования АН РТ О. Ю. Тарасову за предоставленные данные о результатах гидрхимических исследований.

### Литература

1. Brett M.T. Zooplankton communities and acidification process (a review) // Water, Air, Soil Pollut. – 1989. – V. 44. – P. 387–414. – doi: 10.1007/BF00279267.

2. *Schindler D.W.* Changes caused by acidification to the biodiversity: Productivity and biogeochemical cycles of lakes // Steinberg C.E.W., Wright R.F. (Eds.) *Acidification of Freshwater Ecosystems: Implications for the Future*. – Chichester, UK: Wiley & Sons, 1994. – P. 153–164.
3. *Лазарева В.И., Жгарева Н.Н., Гусаков В.А., Иванов В.К.* Структура трофической сети сообществ беспозвоночных в трех небольших озерах с различным уровнем закисления вод: зоопланктон // *Биология внутренних вод*. – 2003. – № 1. – С. 49–57.
4. *Лазарева В.И.* Экология зоопланктона разнотипных водоемов бассейна Верхней Волги: Дис. ... д-ра биол. наук. – Борок, 2008. – 419 с.
5. *Faithfull C.L., Mathisen P., Wenzel A., Bergström A.K., Vrede T.* Food web efficiency differs between humic and clear water lake communities in response to nutrients and light // *Oecologia*. – 2015. – V. 177, No 3. – P. 823–835. – doi: 10.1007/s00442-014-3132-2.
6. *Озера Среднего Поволжья / Под ред. И.Н. Сорокина, Р.С. Петровой*. – Л.: Наука, 1976. – 236 с.
7. *Ochocka A., Paształeniec A.* Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions // *Environ. Monit. Assess.* – 2016. – V. 188. – Art. 622, P. 1–16. – doi: 10.1007/s10661-016-5634-3.
8. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. – Л.: Зоол. ин-т АН СССР – ГосНИОРХ, 1982. – 33 с.
9. *Hakkari L.* Zooplankton species as indicators of environment // *Aqua Fenn. (Helsinki)*. – 1972. – P. 46–54.
10. *Андроникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. – СПб.: Наука, 1996 – 189 с.
11. *Adamczuk M., Mieczan T., Tarkowska-Kukuryk M., Demetraki-Paleolog A.* Rotatoria–Cladocera–Copepoda relations in the long-term monitoring of water quality in lakes with trophic variation (E. Poland) // *Environ. Earth Sci.* – 2015. – V. 73, No 12. – P. 8189–8196. – doi: 10.1007/s12665-014-3977-z.
12. *Whittaker R.H.* Dominance and diversity in land plant communities // *Science*. – 1965. – V. 147, No 3655. – P. 250–260. doi: 10.1126/science.147.3655.250.
13. *Shannon C.E., Weaver W.* *The Mathematical Theory of Communication*. – Urbana: Univ. Ill. Press, 1949. – 117 p.
14. *Sládeček V.* System of water quality from biological point of view // *Adv. Limnol.* – 1973. – V. IV. – 218 p.
15. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 443 с.
16. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 268 с.
17. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. – М.: Химия, 1973. – 376 с.
18. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanogr.* – 1977. – V. 22, No 2. – P. 361–369. – doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
19. *Баранов И.В.* Лимнологические типы озер СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 276 с.
20. *Хатчинсон Д.* Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер. – М.: Мир, 1969. – 590 с.
21. *Алексеев В.Р., Глаголев С.М., Добрынина Т.И., Котов А.А., Кутикова Л.А., Мазей Ю.А., Малявин С.А., Наумова Е.Ю., Синев А.Ю., Смирнов Н.Н., Степанова Л.А., Стойко Т.Г., Сухих Н.М., Телеш И.В., Фефилова Е.Б., Фильчаков В.А.* Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. – М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. – 495 с.

22. *Лазарева В.И.* Трансформация сообществ зоопланктона малых озер при закислении // Труды ИБВВ РАН. – СПб.: Наука, 1994. – Вып. 70: Структура и функционирование экосистем кислотных озер. – С. 150–169.
23. *Иванова М.Б.* Влияние активной реакции и общей минерализации воды на формирование сообществ зоопланктона в озерах при приближении этих факторов к экстремальным // Труды Зоол. ин-та – 1997. – Т. 272: Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. – С. 71–86.
24. *Gray D.K., Arnott S.E., Shead J.A., Derry A.M.* The recovery of acid-damaged zooplankton communities in Canadian Lakes: The relative importance of abiotic, biotic and spatial variables // *Freshwater Biol.* – 2012. – V. 57, No 4. – P. 741–758. – doi: 10.1111/j.1365-2427.2012.02739.x.
25. *Stuchlík E., Bitušík P., Hardekopf D.W., Hořická Z., Kahounová M., Tátošová J., Vondrák D., Dočkalová K.* Complexity in the biological recovery of Tatra Mountain lakes from acidification // *Water, Air, Soil Pollut.* – 2017. – V. 228, No 5. – Art. 184, P. 1–19. – doi: 10.1007/s11270-017-3362-0.
26. *Korosi J.B., Smol J.P.* Contrasts between dystrophic and clearwater lakes in the long-term effects of acidification on cladoceran assemblages // *Freshwater Biol.* – 2012. – V. 57, No 12. – P. 2449–2464. – doi: 10.1111/fwb.12012.
27. *Valois A.E., Bill Keller W., Ramcharan C.W.* Recovery in a multiple stressor environment: Using the reference condition approach to examine zooplankton community change along opposing gradients // *J. Plankton Res.* – 2011. – V. 33, No 9. – P. 1417–1429. – doi: 10.1093/plankt/fbr036.
28. *Vrba J., Bojková J., Chvojka P., Fott J., Kopáček J., Macek M., Nedbalová L., Papáček M., Rádková V., Sacherová V., Soldán T., Šorf M.* Constraints on the biological recovery of the Bohemian Forest lakes from acid stress // *Freshwater Biol.* – 2016. – V. 61, No 4. – P. 376–395. – doi: 10.1111/fwb.12714.
29. *Вандыш О.И.* Влияние закисления на зоопланктонные сообщества малых озер горной тундры // *Водные ресурсы.* – 2002. – Т. 29, № 5. – С. 602–609.
30. *Siegfried C.A., Bloomfield J.A., Sutherland J.W.* Planktonic rotifer community structure in Adirondack, New York, U.S.A. lakes in relation to acidity, trophic status and related water quality characteristics // *Hydrobiologia.* – 1989. – V. 175, No 1. – P. 33–48. – doi: 10.1007/BF00008473.
31. *Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н.* Структура сообществ зоопланктона озер Волжско-Камского заповедника // Труды Зоол. ин-та РАН. – 2016. – Т. 320, № 3. – С. 294–303.

Поступила в редакцию  
23.03.18

---

**Деревенская Ольга Юрьевна**, кандидат биологических наук, доцент кафедры природообустройства и водопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [oderevenskaya@mail.ru](mailto:oderevenskaya@mail.ru)

**Унковская Елена Николаевна**, старший научный сотрудник

Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник  
ул. Вехова, д. 1, пос. Садовый, Зеленодольский р-н, Республика Татарстан, 422537, Россия  
E-mail: [l-unka@mail.ru](mailto:l-unka@mail.ru)

**Мингазова Нафиса Мансуровна**, доктор биологических наук, профессор кафедры природообустройства и водопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [nmingaz@mail.ru](mailto:nmingaz@mail.ru)

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2019, vol. 161, no. 4, pp. 521–537

doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.521-537

### Zooplankton under the Conditions of Lake Eutrophication and Acidification

O.Y. Derevenskaya<sup>a\*</sup>, E.N. Unkovskaya<sup>b\*\*</sup>, N.M. Mingazova<sup>a\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>b</sup>Volga-Kama State Nature Biosphere Reserve, Sadovyi, 422537 Russia

E-mail: <sup>\*</sup>[oderevenskaya@mail.ru](mailto:oderevenskaya@mail.ru), <sup>\*\*</sup>[l-unka@mail.ru](mailto:l-unka@mail.ru), <sup>\*\*\*</sup>[nmingaz@mail.ru](mailto:nmingaz@mail.ru)

Received March 23, 2018

#### Abstract

Bogging processes are accompanied by the accumulation of humic acids, pH decrease, and low values of oxygen dissolved in water. Environmental conditions that are unfavorable for hydrobionts affect zooplankton communities and change their structure.

We studied zooplankton of 14 lakes in the Middle Volga region (Russia). The lakes are acidified to different degrees; three groups of lakes were distinguished according to the degree of acidification: acidic (pH 5–5.5), transitional (pH 5.6–6.5), and neutral (pH > 6.5). The purpose of the study was to reveal the peculiarities of the structure of zooplankton communities under the conditions of natural bogging and acidification.

The abundance of zooplankton was of the same order in the acidic and transitional lakes and about three times higher in the neutral ones, while rotifers were dominant in the acidic mesotrophic and neutral eutrophic lakes, where they comprised about 80% of the population. The biomass in the acidic and neutral lakes was low and did not exceed 1 g/m<sup>3</sup>.

Changes in the abundance of prevailing zooplankton groups by the pH gradient were revealed. With the decrease in the acidity, the following changes were observed: *Conochilus hippocrepis* (Schrank, 1803) was replaced by *C. unicornis* Rousset, 1892; the proportion of the genera *Kellicottia*, *Keratella*, and *Ceriodaphnia* increased; *Postclausa hyptopus* (Ehrenberg, 1838) appeared; and the abundance of the genus *Eudiaptomus* increased. In the neutral lakes, the proportion of the genus *Keratella*, as well as that of the genera *Asplanchna*, *Polyarthra*, and *Trichocerca*, increased and the species composition became typical for the eutrophic lakes of the Middle Volga region.

In the acidic lakes, an increase in the number of microdetritivores of the genus *Diaphanosoma* (biomass) was noticed. Its value decreased in the transitional lakes, where they were replaced by the genus *Daphnia* and the genus *Ceriodaphnia*. In the transitional lakes, compared with the acidic ones, the proportion of coarse filter feeders of the genus *Eudiaptomus* increased. In the neutral lakes, they were replaced by crustaceans of the genus *Thermocyclops* and their juvenile stages. The species diversity of zooplankton increased in the direction from the acidic to neutral lakes.

**Keywords:** zooplankton, bog, acidification, waterlogging, structure, community, bioindication, lake

**Acknowledgments.** We are grateful to L.R. Pavlova (Engineer of Optimization of Water-Related Ecosystems Laboratory, Kazan Federal University) and O.Yu. Tarasov (Head of Laboratory for Environmental Analytical Measurements and Environmental Monitoring of Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences) for providing us with data of the hydrochemical research.

### Figure Captions

Fig. 1. Abundance ( $N$ , thousand ind/m<sup>3</sup>) of zooplankton of different taxonomic groups in the studied types of lakes.

Fig. 2. Biomass ( $B$ , g/m<sup>3</sup>) of taxonomic groups of zooplankton in the studied groups of lakes.

### References

1. Brett M.T. Zooplankton communities and acidification process (a review). *Water, Air, Soil Pollut.*, 1989, vol. 44, pp. 387–414. doi: 10.1007/BF00279267.
2. Schindler D.W. Changes caused by acidification to the biodiversity: Productivity and biogeochemical cycles of lakes. In: Steinberg C.E.W., Wright R.F. (Eds.) *Acidification of Freshwater Ecosystems: Implication for the Future*. Chichester, UK, Wiley & Sons, 1994, pp. 153–164.
3. Lazareva V.I., Zhigareva N.N., Gusakov V.A., Ivanov V.K. Trophic web structure of invertebrate communities in three small lakes with different levels of water acidification: Zooplankton. *Biol. Vnutr. Vod*, 2003, no. 1, pp. 49–57. (In Russian)
4. Lazareva V.I. Zooplankton ecology in different types of reservoirs in the Upper Volga River basin. *Doct. Bio. Sci. Diss.* Borok, 2008. 419 p. (In Russian)
5. Faithfull C.L., Mathisen P., Wenzel A., Bergström A.K., Vrede T. Food web efficiency differs between humic and clear water lake communities in response to nutrients and light. *Oecologia*, 2015, vol. 177, no. 3, pp. 823–835. doi: 10.1007/s00442-014-3132-2.
6. *Ozera Srednego Povolzh'ya* [Lakes of the Middle Volga Region]. Sorokin I.N., Petrova R.S. (Eds.). Leningrad, Nauka, 1976. 236 p. (In Russian)
7. Ochocka A., Pasztaleniec A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions. *Environ. Monit. Assess.*, 2016, vol. 188, art. 622, pp. 1–16. doi: 10.1007/s10661-016-5634-3.
8. *Metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniyakh na presnovodnykh vodoemakh. Zooplankton i ego produktsiya* [Methodological Recommendations for Sampling and Processing of Materials during Hydrobiological Research of Freshwater Reservoirs. Zooplankton and Its Products]. Leningrad, Zool. Inst. Akad. Nauk SSSR. GosNIORKh, 1982. 33 p. (In Russian)
9. Hakkari L. Zooplankton species as indicators of the environment. *Aqua Fenn.* (Helsinki), 1972, pp. 46–54.
10. Andronikova I.N. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya zooplanktona ozernykh ekosistem raznykh troficheskikh tipov* [Structural and Functional Organization of Zooplankton in Lake Ecosystems of Different Trophic Types]. St. Petersburg, Nauka, 1996. 189 p. (In Russian)
11. Adamczuk M., Mieczan T., Tarkowska-Kukuryk M., Demetraki-Paleolog A. Rotatoria–Cladocera–Copepoda relations in the long-term monitoring of water quality in lakes with trophic variation (E. Poland). *Environ. Earth Sci.*, 2015, vol. 73, no. 12, pp. 8189–8196. doi: 10.1007/s12665-014-3977-z.
12. Whittaker R.H. Dominance and diversity in land plant communities. *Science*, 1965, vol. 147, no. 3655, pp. 250–260. doi: 10.1126/science.147.3655.250.
13. Shannon C.E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, Univ. Ill. Press, 1949. 117 p.
14. Sládeček V. System of water quality from biological point of view. *Adv. Limnol.*, 1973, vol. IV. 218 p.
15. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970. 443 p. (In Russian)
16. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev B.A. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushy* [Handbook on Chemical Analysis of Inland Waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973. 268 p. (In Russian)
17. Lur'e Yu.Yu. *Unifitsirovannye metody analiza vod* [Uniform Methods of Water Analysis]. Moscow, Khimiya, 1973. 376 p. (In Russian)
18. Carlson R.E. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 1977, vol. 22, no. 2, pp. 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.



19. Baranov I.V. *Limnologicheskie tipy ozer SSSR* [Limnological Types of Lakes in the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1962. 276 p. (In Russian)
20. Hutchinson D. *Limnologiya. Geograficheskie, fizicheskie i khimicheskie kharakteristiki ozer* [Limnology. Geographical, Physical, and Chemical Characteristics of Lakes]. Moscow, Mir, 1969. 590 p. (In Russian)
21. Alekseev V.R., Glagolev S.M., Dobrynina T.I., Kotov A.A., Kutikova L.A., Mazei Yu.A., Malyavin S.A., Naumova E.Yu., Sinev A.Yu., Smirnov N.N., Stepanova L.A., Stoiko T.G., Sukhikh N.M., Telesh I.V., Fefilova E.B., Fil'chakov V.A. *Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeiskoi Rossii* [Key to Zooplankton and Zoobenthos of Fresh Waters of European Russia]. Moscow, Tovarishestvo Nauchn. Izd. KMK, 2010. 495 p. (In Russian)
22. Lazareva V.I. Transformation of zooplankton communities during acidification of small lakes. *Tr. Inst. Biol. Vnutr. Vod Ross. Akad. Nauk*, 1994, no. 70: Ecosystem structure and functioning in acidic lakes, pp. 150–169. (In Russian)
23. Ivanova M.B. Effects of water active reaction and total mineralization approaching extreme values on the formation of zooplankton communities in lakes. *Tr. Zool. Inst. Ross. Akad. Nauk*, 1997, vol. 272: Response of lake ecosystems to changes in biotic and abiotic conditions, pp. 71–86. (In Russian)
24. Gray D.K., Arnott S.E., Shead J.A., Derry A.M. The recovery of acid-damaged zooplankton communities in Canadian Lakes: The relative importance of abiotic, biotic and spatial variables. *Freshwater Biol.*, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 741–758. doi: 10.1111/j.1365-2427.2012.02739.x.
25. Stuchlík E., Bitušík P., Hardekopf D.W., Hořická Z., Kahounová M., Tátosová J., Vondrák D., Dočkalová K. Complexity in the biological recovery of Tatra Mountain lakes from acidification. *Water, Air, Soil Pollut.*, 2017, vol. 228, no. 5, art. 184, pp. 1–19. doi: 10.1007/s11270-017-3362-0.
26. Korosi J.B., Smol J.P. Contrasts between dystrophic and clearwater lakes in the long-term effects of acidification on cladoceran assemblages. *Freshwater Biol.*, 2012, vol. 57, no. 12, pp. 2449–2464. doi: 10.1111/fwb.12012.
27. Valois A.E., Bill Keller W., Ramcharan C.W. Recovery in a multiple stressor environment: Using the reference condition approach to examine zooplankton community change along opposing gradients. *J. Plankton Res.*, 2011, vol. 33, no. 9, pp. 1417–1429. doi: 10.1093/plankt/fbr036.
28. Vrba J., Bojková J., Chvojka P., Fott J., Kopáček J., Macek M., Nedbalová L., Papáček M., Rádková V., Sacherová V., Soldán T., Šorf M. Constraints on the biological recovery of the Bohemian Forest lakes from acid stress. *Freshwater Biol.*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 376–395. doi: 10.1111/fwb.12714.
29. Vandysh O.I. Effect of acidification on zooplankton communities of small lakes in mountain tundra. *Water Resour.*, 2002, vol. 29, no. 5, pp. 554–560. doi: 10.1023/A:1020382016192.
30. Siegfried C.A., Bloomfield J.A., Sutherland J.W. Planktonic rotifer community structure in Adirondack, New York, U.S.A. lakes in relation to acidity, trophic status and related water quality characteristics. *Hydrobiologia*, 1989, vol. 175, no. 1, pp. 33–48. doi: 10.1007/BF00008473.
31. Derevenskaya O.Y., Unkovskaya E.N. Zooplankton community structure of lakes of the Volga-Kama Nature Reserve. *Tr. Zool. Inst. Ross. Akad. Nauk*, 2016, vol. 320, no. 3, pp. 294–303. (In Russian)

Для цитирования: Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н., Мингазова Н.М. Зоопланктон озер в условиях заболачивания и закисления // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 4. – С. 521–537. – doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.521-537.

For citation: Derevenskaya O.Y., Unkovskaya E.N., Mingazova N.M. Zooplankton under the conditions of lake eutrophication and acidification. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2019, vol. 161, no. 4, pp. 521–537. doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.521-537. (In Russian)