

Влияние колонии серой цапли (*Ardea cinerea* L.) на планктон малого озера и содержание в нем незаменимых полиненасыщенных жирных кислот

А. В. КРЫЛОВ¹, М. И. ГЛАДЫШЕВ^{2, 3}, Д. Б. КОСОЛАПОВ¹, Н. Н. СУЩИК^{2, 3}, Л. Г. КОРНЕВА¹,
О. Н. МАХУТОВА², Д. В. КУЛАКОВ¹, Г. С. КАЛАЧЕВА², О. П. ДУБОВСКАЯ²

¹ *Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
152742, пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н
E-mail: krylov@ibiw.yaroslavl.ru*

² *Институт биофизики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок*

³ *Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79*

АННОТАЦИЯ

Показано, что на участке обитания колонии цапель в высокотрофном мелководном озере у ряда структурных показателей планктона происходят изменения, сходные с наблюдаемыми при антропогенном эвтрофировании и указывающие на увеличение биогенной и органической нагрузки. Одновременно выявлен ряд изменений, обычно не регистрируемых при усилении антропогенного воздействия. По составу и содержанию полиненасыщенных жирных кислот в sestone и зоопланктоне установлено, что на участке озера, испытывающем влияние птиц, в пище зоопланктона сравнительно меньшую роль играют диатомовые водоросли и детрит наземного происхождения. Зоопланктон, развивающийся в зоне влияния птиц, является более качественным кормом, богатым незаменимой докозагексаеновой кислотой, необходимой для роста и развития рыб.

Ключевые слова: мелководное озеро, планктонное сообщество, цапля, незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты.

Исследования жизнедеятельности водных и околоводных позвоночных животных, оказывающих существенное влияние на химический и биологический режим водных экосистем,

до сих пор не заняли должного места в практике гидробиологических работ. Среди таких животных особое место занимают птицы, образующие колонии в прибрежных участках водоемов [1–7]. Ранее проведенные авторами исследования позволили выявить изменения видового богатства, численности, биомассы, соотношения таксономических групп зоопланктона на разнотипных мелководьях мезотрофного Рыбинского водохранилища и олиго-мезотрофного оз. Севан, находящихся под влиянием колоний птиц сем.

Крылов Александр Витальевич
Гладышев Михаил Иванович
Косолапов Дмитрий Борисович
Сущик Надежда Николаевна
Корнева Людмила Генриховна
Махутова Олеся Николаевна
Кулаков Дмитрий Владимирович
Калачева Галина Сергеевна
Дубовская Ольга Петровна

Чайковых (Laridae) [1–3]. Возникает вопрос, способны ли колонии околоводных птиц выступать в роли агентов, модифицирующих продуцирование в водной среде необходимых для жизни водных животных веществ, в том числе полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК). ПНЖК играют ключевую роль в метаболизме животных всех систематических групп, являясь биохимическими предшественниками простагландинов, тромбосанов, лейкотриенов, регулирующих многие важнейшие физиолого-биохимические функции организма. Наибольшее значение имеют незаменимые длинноцепочечные ПНЖК семейства $\omega 3$, такие как эйкозапентаеновая (ЭПК, 20 : 5 $\omega 3$) и докозагексаеновая (ДГК, 22 : 6 $\omega 3$) [8–10]. Для нормального развития и роста личинок рыб особенно необходим высокий уровень ДГК в пище [11]. Из всех групп организмов способностью к синтезу ЭПК и ДГК обладают лишь некоторые микроводоросли. ПНЖК, синтезированные этими водорослями, передаются по трофическим сетям к водным беспозвоночным, а от них – к рыбам.

Цель работы – сравнительное изучение структуры планктонного сообщества и содержания полиненасыщенных жирных кислот в sestone и зоопланктоне малого высокопродуктивного озера на участке обитания колонии серой цапли (*Ardea cinerea* L.) и на контрольном (фоновом) участке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили летом 2008 г. на малом озере Чистое (бассейн Горьковского водохранилища). Площадь озера 4,5 км², средняя глубина – 1,0 м, максимальная глубина – 1,8 м. Пробы собирали раз в месяц на зарастающем макрофитами мелководье: фоновом участке (57°42'295" с. ш., 40°33'376" в. д.) и на участке, куда приходился основной приток продуктов жизнедеятельности птиц (57°3'330" с. ш., 40°33'722" в. д.). Они поступали по руслу ручья, формирующегося во время дождей и получающего стоки с площади колонии цапель. Первый ряд гнезд птиц находился на вершинах высоких (15–20 м) сосен на расстоянии ~30 м от уреза воды. В ко-

лонии обнаружено >50 жилых гнезд, численность взрослых птиц составляла >100 особей. В июне и июле цапли активно выкармливали птенцов, в августе взрослые и молодые птицы большую часть дневного времени проводили вне территории колонии, возвращаясь туда лишь на ночевку.

Глубина на станциях отбора проб составляла 0,4 м. Прозрачность и температура воды на обоих исследуемых участках были примерно одинаковыми. Содержание растворенного кислорода в зоне влияния колонии цапель было ниже на 0,5–3,4 мг/л, однако не достигало величин, способных угнетать развитие гидробионтов. На этом же участке отмечено незначительное – на 7–11 мкСм/см – увеличение электропроводности воды.

В каждую дату наблюдений на обоих участках собирали по 3 пробы бактерио- и фитопланктона и по 12 проб зоопланктона. Формировали интегральную пробу воды, отбирая 10 раз мерным сосудом объем 1 л с площади ~10 м². Из интегральной пробы отбирали аликвоту объемом 60 мл для определения количественных параметров развития микроорганизмов. Аликвоту фиксировали формальдегидом до концентрации 2 % и хранили в холодильнике не более 1 мес. Количество и размеры пикофитопланктона, бактерий и гетеротрофных жгутиконосцев, а также численность вирусных частиц учитывали методом эпифлуоресцентной микроскопии [12] с окраской флуорохромами ДАФИ [13], SYBR Green I [14] и примулина [15]. Фильтры с осажденными на них микроорганизмами просматривали под эпифлуоресцентным микроскопом Olympus BX51 (Япония) при увеличении в 1000 раз. Размеры клеток измеряли с помощью системы анализа изображений, рассчитывали их объемы и биомассу, приравнивая плотность к единице [12]. В июне и августе из интегрального объема воды брали 0,5 л для исследования фитопланктона, консервировали фиксатором на основе раствора Люголя (по [16]), фильтровали последовательно на мембранные фильтры с диаметром пор 5 и 1,2 мкм. Пробы зоопланктона собирали, процеживая 25–50 л воды через капроновое сито с ячейей 64 мкм, фиксировали 4 %-м формалином. Камеральную обработку проб фито- и зоо-

планктона проводили по стандартной методике [16]. Результаты анализа показателей зоопланктона представлены в виде средних и их ошибок ($x \pm m_x$), для оценки достоверности использовали t -критерий Стьюдента при $p = 0,05$.

Одновременно с пробами для количественного учета планктона на изучаемых участках в каждую дату отбирали по три пробы сестона и зоопланктона для определения жирнокислотного состава липидов. Воду разделяли на фракции сестона и зоопланктона фильтрованием через сеть с размерами пор 100 мкм. Пробы сестона и зоопланктона фильтровали на предварительно промытые фильтры «Владипор» с диаметром пор 0,75–0,85 мкм с прокладкой из $BaSO_4$, подсушенный осадок отделяли от фильтра и хранили в смеси хлороформ-метанол (2 : 1, по объему) при -20 °С до последующей обработки. Процедура биохимического анализа проб, включавшая экстракцию липидов, приготовление метиловых эфиров жирных кислот (ЖК) для газохроматографического анализа, подробно описана в работах [17–19]. Анализ метиловых эфиров ЖК проводили на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором 6890N/5975С (Agilent Technologies, США), условия анализа и идентификации пиков подробно изложены в работе [18]. Пики жирных кислот идентифицировали по полученным масс-спектрам, сравнивая их с имеющимися в базе данных NIST2005, а также путем сравнения времен удерживания с таковыми стандартов (Sigma, США).

Сравнение жирнокислотного состава сестона и зоопланктона двух участков проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа в сочетании с «post-hoc» тестом Фишера в программе Statistica 7.0 (StatSoft, Inc., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая численность фитопланктона достигала значительных величин на обоих участках озера (табл. 1). Доминантами по численности были мелкоклеточные колониальные синезеленые водоросли *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronberg et Komárek (= *Microcystis*

holsatica (Lemm.) Lemm.) (38–59 % от суммарной численности). Основу биомассы составляли синезеленые, диатомовые и зеленые водоросли, но на участке, подверженном влиянию птиц, биомасса синезеленых водорослей превышала биомассу диатомей в большей степени: в 3,2 раза в июне, в 1,7 – в августе, тогда как на фоновом участке – только в 1,6 и 1,4 раза соответственно.

В озере отмечен высокий уровень развития планктонных микроорганизмов (см. табл. 1). Летняя динамика их количественных характеристик существенно различалась по участкам: на фоновом мелководье максимальные величины численности и биомассы пикофитопланктона отмечены в июне, а в остальное время они были в 2–3 раза ниже; в зоне влияния птиц в июне эти параметры, напротив, были минимальными, а максимум регистрировался в июле. Количество гетеротрофных жгутиконосцев на фоновом участке изменялось слабо, в то время как в зоне колонии цапель отмечены более резкие колебания с ярко выраженным максимумом численности в июле и биомассы – в июне. На фоновом участке по сравнению с зоной влияния птиц биомасса гетеротрофных жгутиконосцев была выше, а бактерий – ниже за весь период изучения, биомасса пикофитопланктона и количество вирусных частиц – ниже в большинстве случаев обледования.

На участке, находящемся в зоне влияния цапель, в планктоне выявлено 30 видов беспозвоночных: 12 видов коловраток, 3 – веслоногих и 15 – ветвистоусых ракообразных; на фоновом – 26 видов: 9, 4 и 13 соответственно. В июне и июле максимальное видовое богатство было в зоне влияния птиц, а в августе наибольшее число видов отмечено на фоновом участке (см. табл. 1). В июне максимальная численность и биомасса зоопланктона зарегистрирована в зоне влияния птиц (см. табл. 1). По численности в зоопланктоне обоих участков преобладали Copepoda, однако на фоновом участке доля Cladocera была значимо меньше (соотношение средних $N_{Cladocera}/N_{Copepoda}$ на фоновом участке – 0,18, в зоне влияния птиц – 0,86). На фоновом участке доминировали науплиусы, копеподиты циклопов и *Brachionus angularis* Gosse, а

Показатели планктонных организмов на фоне (I) и испытывающем влияние продуктов жизнедеятельности колонии птиц (II) мелководьях

Группа	Показатель	Июль		Июль		Август	
		I	II	I	II	I	II
ПФП	$N, 10^3$ кл./мл	1370	384	308	660	423	532
	$B, \text{мг}/\text{м}^3$	2703	611	533	1199	800	944
БП	$N, 10^6$ кл./мл	12,1	13,6	13,1	14,0	9,2	8,6
	$B, \text{мг}/\text{м}^3$	751	871	916	1078	879	943
ГНФ	$N, \text{кл.}/\text{мл}$	8971	4485	8971	9611	7048	3204
	$B, \text{мг}/\text{м}^3$	564	467	486	313	319	157
ВП	$N, 10^6$ частиц/мл	48,4	65,9	97,4	115,9	95,5	90,8
	S	14	26	-	-	24	19
ФП	Синезеленые	24	10	-	-	15	13
	Диатомовые	61	52	-	-	44	27
Зеленые	Фитофлагелляты	9	7	-	-	13	25
	Общая	108	95	-	-	97	84
$N, 10^6$ кл./л	Синезеленые	812	796	-	-	492	313
	Диатомовые	34	23	-	-	23	13
Зеленые	Фитофлагелляты	54	28	-	-	19	19
	Общая	0,7	0,4	-	-	0,6	3
$B, \text{г}/\text{м}^3$	Синезеленые	900	847	-	-	534	348
	Диатомовые	11,58	16,96	-	-	8,87	7,71
Зеленые	Фитофлагелляты	7,42	5,36	-	-	6,40	4,56
	Общая	5,50	3,88	-	-	3,01	2,88
ЗП	Фитофлагелляты	0,96	0,31	-	-	0,56	6,22
	Общая	25,46	26,51	-	-	18,84	21,44
S	Rotifera	7	12	3	4	3	2
	Sopropoda	3	3	1	1	2	1
Cladocera	Cladocera	10	13	9	10	10	9
	Всего	20	28	13	15	15	12
N	Rotifera, %	9,9 ± 7,2	2,4 ± 0,9	0,08 ± 0,04	0,3 ± 0,2	0,1 ± 0,1	0,4 ± 0,5
	Sopropoda, %	76,5 ± 9,5	52,5 ± 20,8	96,3 ± 1,5	97,6 ± 1,0	41,4 ± 16,4	84,3 ± 5,4*
B	Cladocera, %	13,6 ± 4,8	45,1 ± 21,2*	3,6 ± 1,5	2,1 ± 1,0	58,5 ± 16,3	15,3 ± 5,1*
	Общая, тыс. экз./м ³	40,3 ± 10,1	167,5 ± 57,1*	460,3 ± 134,1	370,0 ± 40,5	192,5 ± 8,7	40,5 ± 14,3*
Соперода, %	Rotifera, %	0,6 ± 0,9	0,8 ± 1,2	0,004 ± 0,002	0,09 ± 0,07	0,002 ± 0,004	0,02 ± 0,04
	Sopropoda, %	19,4 ± 24,8	28,6 ± 21,5	53,5 ± 31,2	83,4 ± 14,3	9,9 ± 7,0	28,1 ± 13,5
Общая, г/м ³	Cladocera, %	80,1 ± 25,6	70,6 ± 21,3	46,5 ± 31,2	16,5 ± 14,3	90,1 ± 7,0	71,9 ± 13,5
	Общая, г/м ³	0,6 ± 0,3	1,5 ± 0,8	2,6 ± 0,4	1,4 ± 0,4*	5,8 ± 1,2	1,2 ± 0,9*
Доля детритофагов от общей $N, \%$		9,0	3,9	3,7	1,5	57,9	12,3
То же от общей $B, \%$		15,8	26,2	31,7	16,0	44,4	11,4

Примечание. ПФП – пикофитопланктон; БП – бактериопланктон; ГНФ – гетеротрофные нанофлагелляты; ВП – вирусные частицы; ФП – фитопланктон; ЗП – зоопланктон; N – численность; B – биомасса; S – число видов; * – достоверные отличия ($p = 0,05$).

в зоне влияния птиц – молодь циклопов и *Ceriodaphnia pulchella* Sars, *Bosmina longirostris* (O. F. Müller). Основу биомассы на обоих участках составляли кладоцеры, на фоновом доминировали *Leptodora kindtii* (Focke), *Limnosedia frontosa* Sars и копеподиты циклопов, на участке влияния птиц – *Ceriodaphnia pulchella*, *Bosmina longirostris*, *Daphnia cucullata* Sars, а также копеподиты циклопов, *Cyclops vicinus* Uljanin, *Acanthocyclops vernalis* (Fischer). В июле соотношение численности и биомассы зоопланктона на двух участках было обратным: в зоне влияния птиц по сравнению с фоном они были ниже (биомасса – достоверно). По численности и биомассе на обоих мелководьях доминировали ювенильные стадии циклопов, но наблюдалась тенденция увеличения их относительного обилия при сокращении доли кладоцер в зоне воздействия птиц ($N_{\text{Cladocera}}/N_{\text{Copepoda}}$ фоновое – 0,04, в зоне влияния птиц – 0,02). В августе численность и биомасса зоопланктона были достоверно ниже на участке влияния птиц, чем на фоновом (см. табл. 1). При этом в первом по сравнению со вторым наблюдалось значимое возрастание доли веслоногих раков и уменьшение относительного обилия ветвистоусых ($N_{\text{Cladocera}}/N_{\text{Copepoda}}$ фоновое 1,41, в зоне влияния птиц – 0,18). По численности на обоих участках доминировали *Limnosedia frontosa*, ювенильные особи циклопов, *Daphnia cucullata*, по биомассе на фоновом мелководье господствовали *D. cucullata*, *Limnosedia frontosa*, копеподиты циклопов, а на участке, расположенном в зоне влияния птиц, – копеподиты циклопов, *Leptodora kindtii*, *Limnosedia frontosa*.

В sestone выявлено 66 ЖК, в зоопланктоне – 65. Процентные содержания ряда кислот (от суммы ЖК) в sestone и зоопланктоне не различались на фоновом участке и в зоне влияния колонии цапель (табл. 2), вместе с тем обнаружены кислоты, доли которых достоверно различались по участкам в среднем за период изучения и в отдельные месяцы (табл. 3). Распределение концентраций (абсолютных значений) ЖК в целом повторяло картину их процентного содержания. Концентрации некоторых кислот в sestone и зоопланктоне участка влияния птиц и фонового достоверно различались (табл. 4).

Исследованные участки мелководья озера с учетом уровня биомассы фитопланктона можно охарактеризовать как эвтрофно-гипертрофные [20]. На участке, испытывающем влияние колонии птиц, возрастали общая биомасса водорослей, биомасса и разнообразие групп, массово развивающихся в водах с высоким содержанием органического вещества, – синезеленых (в июне) и фитофлагеллят (в августе), наблюдалось незначительное сокращение числа видов и общей численности фитопланктона. Величины численности микроорганизмов также характеризовали исследованные участки как богатые органическими и биогенными веществами [21, 22]: биомасса бактерий и вирусных частиц, пикофитопланктона в зоне влияния цапель в большинстве случаев превышала фоновую (см. табл. 1).

Преобладание по биомассе нанофитопланктона (см. ФП в табл. 1) над пикофитопланктоном (см. ПФП в табл. 1) также характеризует воды озера в районе колонии птиц как наиболее обеспеченные биогенными элементами [23]. Так, в июне на фоновом участке отношение биомасс ФП и ПФП равно 9,4, а на участке, подверженном влиянию цапель, гораздо выше – 43,4. Однако в августе различия между участками по этому показателю не наблюдались (на фоновом – 23,5, в зоне влияния птиц – 22,7).

Обнаруженные в высокотрофном озере показатели зоопланктона отличаются от таковых, полученных в мелководьях олиго-мезотрофных водоемов [1–3]. В то же время, независимо от трофического статуса водной экосистемы, в зоопланктоне вблизи колониальных поселений околководных птиц не отмечается массового развития коловраток, сокращения доли веслоногих рачков и общего числа видов, доминирования в сообществе видов-индикаторов высокой степени антропогенной нагрузки.

Структурные характеристики зоопланктона в зоне поселения цапель характеризовались чертами, обычно регистрируемыми при усилении антропогенного эвтрофирования: так, в течение периода гнездования здесь снижалась биомасса зоопланктона [24]. Вместе с тем некоторые показатели отличались своеобразием: к концу периода гнездования

Количественно значимые кислоты, процентное содержание которых в sestone и зоопланктоне было одинаковым на исследованных мелководьях

ЖК	Доля от общего количества ЖК, %		
	Сестон	Зоопланктон	
12 : 0	0,30 ± 0,07	14 : 0	2,95 ± 0,18
I14 : 0	0,32 ± 0,06	ai15 : 0	0,99 ± 0,10
14 : 0	5,18 ± 0,16	15 : 0	1,03 ± 0,05
ai15 : 0	0,44 ± 0,08	16 : 0	20,82 ± 1,04
I15 : 0	0,14 ± 0,04	16 : 1ω9	0,93 ± 0,12
15 : 0	0,80 ± 0,08	16 : 1ω7	5,71 ± 0,55
16 : 1ω9	0,49 ± 0,15	ai17 : 0	0,73 ± 0,05
ai17 : 0	0,36 ± 0,07	18 : 0	7,69 ± 0,31
17 : 0	0,66 ± 0,10	18 : 1ω9	7,36 ± 0,94
16 : 3ω4	0,28 ± 0,09	18 : 2ω6	4,36 ± 0,18
16 : 3ω3	0,61 ± 0,11	18 : 3ω6	1,15 ± 0,17
16 : 4ω3	1,22 ± 0,21	18 : 3ω3	5,64 ± 0,34
18 : 0	10,41 ± 1,68	18 : 4ω3	2,43 ± 0,24
18 : 1ω9	19,65 ± 2,73	20 : 0	0,53 ± 0,06
18 : 1ω7	3,61 ± 0,36	22 : 0	0,71 ± 0,08
18 : 1ω5	0,28 ± 0,20	22 : 5ω3	0,74 ± 0,11
18 : 2ω6	3,45 ± 0,33	24 : 0	1,17 ± 0,14
18 : 3ω3	5,70 ± 0,60	Сумма, мкг/л	10,1 ± 1,56
18 : 4ω3	1,38 ± 0,23		
20 : 0	0,27 ± 0,08		
20 : 4ω3	0,11 ± 0,03		
22 : 0	0,24 ± 0,06		
24 : 0	0,47 ± 0,11		
22 : 6ω3	0,31 ± 0,10		
Сумма, мкг/л	1214 ± 182		

цапель здесь увеличивалась доля веслоногих ракообразных и, соответственно, уменьшалась величина $N_{Cladocera}/N_{Copepoda}$. Можно предположить, что поступление азота с экскрементами и погядками птиц могло увеличить стехиометрические соотношения содержания азота и фосфора до величин, благоприятных для развития копепод (см. обзор [25]) и для крупных хищных кладоцер, например лептодор [26], с высокими значениями N : P в их телах (к сожалению, данные по содержанию в воде азота и фосфора и их динамике отсутствуют).

Различия ЖК между участками в целом отражали полученные гидробиологические данные. Высокое процентное содержание в сестоне фонового участка кислот 16 : 1ω7 и 20 : 5ω3 (см. табл. 3) обусловлено большим, чем в районе колонии цапель, количеством

диатомовых водорослей (см. табл. 1), для которых эти кислоты характерны (см. обзор [8]). В июне в сестоне фонового участка больше зеленых водорослей, чем в районе колонии цапель (по численности в 2 раза, а по биомассе в 1,4), благодаря чему здесь высокое процентное содержание кислоты 18 : 3ω6, маркера зеленых водорослей [8]. Высокая доля в сестоне ЖК 16 : 0 в зоне влияния птиц указывает на большее, чем на фоновом участке, содержание здесь детрита [27]. Детрит на фоновом участке, вероятно, активнее выедали зоопланктеры-детритофаги, доля которых (по [28]) там была выше (см. табл. 1).

По содержанию в зоопланктоне арахидоновой кислоты 20 : 4ω6 (АК) также можно заключить, что на фоновом участке в его пище содержание детрита наземного происхождения больше, чем у беспозвоночных

Кислоты, процентное содержание которых в сестоне (С) и зоопланктоне (ЗП) достоверно различалось на исследованных мелководьях в отдельные месяцы и в среднем за период исследования

Группа	ЖК	Сроки	Фон	Колония	MSEr	MSEf	F	p
С	16:106	Июнь	0,59 ± 0,03	0,00	0,015	0,252	16,357	0,000374
	16:204	»	0,86 ± 0,05	0,00	0,062	0,500	8,105	0,005923
	18:306	»	0,73 ± 0,10	0,00	0,063	0,424	6,742	0,010898
	20:406	Июль	1,58 ± 0,01	1,00 ± 0,18	0,089	0,350	3,945	0,048226
	16:0	В среднем	24,52 ± 0,48	26,94 ± 1,11	4,70	26,38	5,612	0,035466
	16:107	»	14,67 ± 2,30	9,72 ± 1,63	4,81	110,40	22,921	0,000443
	20:503	»	2,97 ± 0,75	1,62 ± 0,46	1,06	8,14	7,671	0,016975
	18:107	Июнь	4,92 ± 0,72	6,71 ± 0,30	0,473	7,483	15,806	0,000582
		Август	5,76 ± 0,61	2,92 ± 0,19	—	—	—	—
	20:406	»	5,25 ± 0,28	2,93 ± 0,22	0,340	2,634	7,742	0,007967
ЗП	20:403	Июль	0,91 ± 0,10	1,29 ± 0,04	0,0138	0,121	8,790	0,005241
	20:503	Август	13,48 ± 0,80	8,07 ± 0,74	2,968	16,601	5,592	0,021104
	22:506	Июль	0,36 ± 0,18	1,51 ± 0,12	0,074	0,636	8,545	0,005763
	22:603	»	7,44 ± 1,83	15,44 ± 1,24	5,342	45,087	8,440	0,006005
		Август	7,15 ± 1,02	13,31 ± 0,51	—	—	—	—
	17:0	В среднем	1,80 ± 0,19	2,07 ± 0,23	0,051	0,302	5,900	0,033471

П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 4: MSEr — Mean Square Error = внутрigrупповая изменчивость; MSEf — Mean Square Effect = межгрупповая изменчивость.

Кислоты, концентрации (мкг/л) которых достоверно различались в отдельные месяцы в сестоне (С) и в среднем за период исследования в зоопланктоне (ЗП) фонового участка и в районе колонии птиц

Группа	ЖК	Месяц	Фон	Колония	MSEr	MSEf	F	p
С	20:503	Июнь	43,1 ± 6,8	12,0 ± 7,8	80,5	869,4	10,8	0,002072
		Июль	48,3 ± 3,8	9,0 ± 2,1	—	—	—	—
ЗП	22:603	Среднее	0,52 ± 0,12	1,28 ± 0,37	0,1	14,2	111,1	0,000000

в районе колонии цапель, и это согласуется с результатами анализа содержания ЖК в сестоне (см. табл. 3). Следует отметить, что максимальное накопление АК в зоопланктоне произошло с задержкой относительно динамики этой кислоты в сестоне. Задержка появления в биомассе зоопланктона некоторых жирных кислот относительно их пиков в сестоне также отмечалась нами ранее в другом эвтрофном водоеме [29]. Кроме этого, в пище зоопланктона фонового участка относительно больше диатомей, чем у зоопланктона в районе колонии, о чем свидетельствует высокое содержание в нем ЭПК (20 : 5ω3). Это полностью согласуется и с результатами анализа ЖК в сестоне (см. табл. 3).

В пище зоопланктона в районе колонии цапель, судя по содержанию ДГК (22 : 6ω3) в нем (см. табл. 3), больше динофитовых водорослей. Действительно, наиболее ярко это проявилось в августе, когда численность и биомасса динофитовых водорослей в районе колонии цапель были выше в 7 и 10 раз соответственно. Вместе с тем различий в содержании ДКГ в сестоне не обнаружено (см. табл. 2). Вероятно, в зоопланктоне зоны влияния птиц присутствовали формы, селективно выедающие динофитовых (о потреблении зоопланктоном динофитовых, в том числе перидиней, см., например [30, 31]), или (и) специфические виды, способные к синтезу ДГК. Скорее всего, такие виды принадлежали к группе копепод, доля которых в зоне влияния птиц выше (см. табл. 1). Известно, что *Copepoda* обычно содержат существенно больше ДГК, чем *Cladocera* [32, 33]. Следовательно, более высокая доля копепод, вероятно, и является причиной более высокого содержания ДГК в биомассе зоопланктона в зоне влияния колонии. Однако среди видов, обнаруженных исключительно в зоне влияния птиц в августе, был не только представитель копепод *Thermocyclops crassus* (Fischer), но и некоторые кладоцеры. Поэтому в настоящее время окончательного заключения о причинах увеличения доли ДГК в зоопланктоне, развивающемся на участке влияния колонии птиц, дать нельзя. Тем не менее, поскольку ДГК является ключевой незаменимой кислотой для роста и развития мальков рыб [11, 34], кормовая ценность зоо-

планктона из зоны колонии цапель в 2 раза выше, чем таковая зоопланктона фонового участка, если учитывать процентное содержание этой кислоты. В зоопланктоне зоны влияния колонии цапель также отмечены достоверно более высокие, чем на фоновом мелководье, абсолютные величины ДГК (см. табл. 4). Это свидетельствует о том, что зоопланктон участка в районе колонии цапель является не только более качественным кормом для рыб, но и способен снабдить большее количество мальков незаменимым и необходимым для роста и развития биохимическим компонентом питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом особенности структурных характеристик планктона эвтрофно-гипертрофного озера в зоне влияния колонии цапель указывают на увеличение биогенной и органической нагрузки и соответствуют изменениям, происходящим при усилении антропогенного эвтрофирования. В частности, возрастала общая биомасса фитопланктона, биомасса и разнообразие синезеленых водорослей и фитоплагеллят, снижались общая численность фитопланктона и биомасса зоопланктона в районе колонии цапель. Однако на этом участке также наблюдались тенденции, отличающиеся от таковых при усилении антропогенного воздействия. В частности, к концу периода гнездования снижалось соотношение биомасс крупного фитопланктона и пикофитопланктона, возрастала доля веслоногих ракообразных и снижалась величина $N_{Cladocera}/N_{Copepoda}$.

Содержание в зоопланктоне разных участков незаменимых ЭПК и АК свидетельствует, что в пище зоопланктона в зоне колонии птиц было относительно меньше диатомей и детрита наземного происхождения, чем у зоопланктона фонового участка. Независимо от уровня количественного развития, зоопланктон в зоне влияния колонии цапель – более качественный корм для рыб и способен снабдить большее количество мальков незаменимой и необходимой для роста и развития докозогексаеновой кислотой.

Следует отметить, что вышеприведенные закономерности получены для одной колонии

на малом озере. Допускаем, что при большом количестве колоний и высокой плотности птиц в колониях количество поступающего азота может оказаться столь большим, что может привести к сильному эвтрофированию водоема и его интенсивному “цветению” с известными негативными последствиями, в том числе – снижению уровня незаменимых ПНЖК [35].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (09-04-00080-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А. В., Касьянов Н. А. Влияние колониальных поселений речной крачки на зоопланктон мелководий Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. 2008. № 2. С. 40–48.
2. Крылов А. В., Акопян С. А. Особенности зоопланктона прибрежной зоны озера Севан // Там же. 2009. № 3. С. 68–72.
3. Крылов А. В., Кулаков Д. В., Касьянов Н. А., Целмювич О. Л., Папченков В. Г. Зоопланктон защищенного зарастающего мелководья Рыбинского водохранилища в условиях влияния колониального поселения птиц // Там же. 2009. № 2. С. 56–61.
4. Чуйков Ю. С. Методы экологического анализа состава и структуры сообществ водных животных. Экологическая классификация беспозвоночных, встречающихся в планктоне пресных вод // Экология. 1981. № 3. С. 71–77.
5. Hahn S., Bauer S., Klaassen M. Estimating the contribution of carnivorous waterbirds to nutrient loading in freshwater habitats // Freshwater Biology. 2007. Vol. 52. P. 2421–2433.
6. Hahn S., Bauer S., Klaassen M. Quantification of allochthonous nutrient input into freshwater bodies by herbivorous waterbirds // Ibid. 2008. Vol. 53. P. 181–193.
7. Limnology and Aquatic Birds / ed. by A. R. Hanson, J. J. Kerekes / Proceedings of the Fourth Conference Working Group on Aquatic Birds of Societas Internationalis Limnologiae (SIL), Sackville, New Brunswick, Canada, August 3–7, 2003. Reprinted from Hydrobiologia. 2006. Vol. 567. 350 p.
8. Сущик Н. Н. Роль незаменимых жирных кислот в трофометаболических взаимодействиях в пресноводных экосистемах (обзор) // Журн. общ. биол. 2008. Т. 69, № 4. С. 299–316.
9. Arts M. T., Ackman R. G., Holub V. J. “Essential fatty acids” in aquatic ecosystems: A crucial link between diet and human health and evolution // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2001. Vol. 58. P. 122–137.
10. Plourde M., Cunnane S. C. Extremely limited synthesis of long chain polyunsaturates in adults: implications for their dietary essentiality and use as supplements // Appl. Physiol. Nutr. Metab. 2007. Vol. 32. P. 619–634.
11. Copeman L. A., Parrish C. C., Brown J. A., Harel M. Effects of docosahexaenoic, eicosapentaenoic, and arachidonic acids on the early growth, survival, lipid composition and pigmentation of yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*): a live food enrichment experiment // Aquaculture. 2002. Vol. 210. P. 285–304.
12. MacIsaac E. A., Stockner J. G. Enumeration of phototrophic picoplankton by autofluorescence microscopy // Handbook of methods in aquatic microbial ecology / eds. P. F. Kemp, B. F. Sherr, E. B. Sherr, J. J. Cole. Boca Raton: Lewes Publishers, 1993. P. 187–197.
13. Porter K. G., Feig Y. S. The use of DAPI for identifying and counting of aquatic microflora // Limnol. Oceanogr. 1980. Vol. 25. P. 943–948.
14. Noble R. T., Fuhrman J. A. Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence count of marine viruses and bacteria // Aquat. Microb. Ecol. 1998. Vol. 14, N 2. P. 113–118.
15. Caron D. A. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescence microscopy, and comparison with other procedures // Appl. Environ. Microbiol. 1983. Vol. 46. P. 491–498.
16. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
17. Gladyshev M. I., Emelianova A. Y., Kalachova G. S., Zotina T. A., Gaevsky N. A., Zhilenkov M. D. Gut content analysis of *Gammarus lacustris* from a Siberian lake using biochemical and biophysical methods // Hydrobiologia. 2000. Vol. 431. P. 155–163.
18. Sushchik N. N., Gladyshev M. I., Kalachova G. S., Kravchuk E. S., Dubovskaya O. P., Ivanova E. A. Particulate fatty acids in two small Siberian reservoirs dominated by different groups of phytoplankton // Freshwater Biol. 2003. Vol. 48. P. 394–403.
19. Gladyshev M. I., Sushchik N. N., Kolmakova A. A., Kalachova G. S., Kravchuk E. S., Ivanova E. A., Makhutova O. N. Seasonal correlations of elemental and $\omega 3$ PUFA composition of seston and dominant phytoplankton species in a eutrophic Siberian Reservoir // Aquatic Ecol. 2007. Vol. 41. P. 9–23.
20. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
21. Копылов А. И., Косолапов Д. Б. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных вод / Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. Сб. мат. междунар. конф. СПб.: Изд-во “Лема”, 2007. С. 176–181.
22. Andersson A., Samuelsson K., Haecky P., Albertsson J. Changes in the pelagic microbial food web due to artificial eutrophication // Aquat. Ecol. 2006. Vol. 40. P. 299–313.
23. Agawin N. S. R., Duarte C. M., Agusti S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production // Limnol. Oceanogr. 2000. Vol. 45. P. 591–600.
24. Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1996. 189 с.
25. Толмеев А. П. Концепция “экологической стехиометрии” в водных экосистемах: литературный обзор // Сиб. экол. журн. 2006. № 1. С. 13–19.
26. Stemberger R. S., Miller E. K. A zooplankton-N:P-ratio indicator for lakes // Environ. Monitoring and Assessment. 1998. Vol. 51. P. 29–51.
27. Hama T. Fatty acid composition of particulate matter and photosynthetic products in subarctic and sub-

- tropical Pacific // *J. Plankton Res.* 1999. Vol. 21, N 7. P. 1355–1372.
28. Монаков А. В. Питание пресноводных беспозвоночных. М.: ИПЭЭ РАН, 1998. 320 с.
 29. Сущик Н. Н., Гладышев М. И., Махутова О. Н., Кравчук Е. С., Дубовская О. П., Калачева Г. С. Сезонное перемещение пула незаменимой эйкозопентаеновой кислоты по пелагической трофической цепи эвтрофного водохранилища // *Докл. АН.* 2008. Вып. 422, № 6. С. 848–849.
 30. Nielsen T. G. Contribution of zooplankton grazing to the decline of a *Ceratium* bloom // *Limnol. Oceanogr.* 1991. Vol. 36. P. 1091–1106.
 31. Cyr H., Curtis J. M. Zooplankton community size structure and taxonomic composition affects size-selective grazing in natural communities // *Oecologia.* 1999. Vol. 118. P. 306–315.
 32. Persson, J., Vrede, T. Polyunsaturated fatty acids in zooplankton: variation due to taxonomy and trophic position // *Freshwat. Biol.* 2006. Vol. 51. P. 887–900.
 33. Smyntek P. M., Teece M. A., Schulz K. L., Storch A. J. Taxonomic differences in the essential fatty acid composition of groups of freshwater zooplankton relate to reproductive demands and generation time // *Ibid.* 2008. Vol. 53. P. 1768–1782.
 34. Bell M. V., Tocher D. R. Biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in aquatic ecosystems: general pathways and new directions // *Lipids in aquatic ecosystems* / eds. M. T. Arts, M. Kainz, M. T. Brett. N.Y.: Springer, 2009. P. 211–236.
 35. Gladyshev M. I., Arts M. T., Sushchik N. N. Preliminary estimates of the export of omega-3 highly unsaturated fatty acids (EPA+DHA) from aquatic to terrestrial ecosystems / *Ibid.* P. 179–209.

Effect of a Colony of the Grey Heron (*Ardea cinerea* L.) on Lacustrine Plankton and Essential Polyunsaturated Fatty Acid Content in Seston and Zooplankton

A. V. KRYLOV¹, M. I. GLADYSHEV^{2,3}, D. B. KOSOLAPOV¹, N. N. SUSHCHIK^{2,3},
L. G. KORNEVA¹, O. N. MAKHUTOVA², D. V. KULAKOV¹, G. S. KALACHOVA²,
O. P. DUBOVSKAYA²

¹*I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters RAS
152742, Borok village, Yaroslavl region
E-mail: krylov@ibiw.yaroslavl.ru*

²*Institute of Biophysics of SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok*

³*Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79*

It is shown that definite changes of some indicators of plankton structure occur in a zone of input of the products of heron vital activity in eutrophic-hypertrophic lake, which points to an increase in organic and inorganic load. These changes are similar to the changes observed during anthropogenic eutrophication. Also a number of indicators, which are usually not registered under increased anthropogenic influence, are revealed. Results of the studies of polyunsaturated fatty acids in seston and zooplankton indicated that a smaller amount of diatoms and components of terrestrial origin were present in zooplankton food from the site near a colony of herons, in comparison with the food from the background site of the lake. Zooplankton developing in the zone of influence of the herons colony is a higher-quality food for fish; it is rich in DHA, which is a fatty acid essential and necessary for their growth and development.

Key words: shallow lake, plankton community, heron, essential polyunsaturated fatty acids.