

ФИТОПЛАНКТОН ОЗЕРА НЕРО В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2017 г.

Л. Г. Корнева¹, И. В. Митропольская¹, С. И. Сиделев²,
В. В. Соловьева¹, Е. Г. Сахарова¹, О. С. Макарова¹

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

²Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
150057 Ярославль, проезд Матросова, 9

Поступила в редакцию 17.06.2020

Представлены сведения о численности, биомассе и составе доминирующих видов фитопланктона сапропелевого мелководного высокотрофного оз. Неро в июне и августе 2017 г. Проведены анализ его пространственного распределения по акватории озера, сравнение полученных данных с результатами предшествующего периода исследования до 2012 г. и статистический анализ связи численности и биомассы фитопланктона с некоторыми гидрофизическими и гидрохимическими параметрами. По значению средней биомассы фитопланктона (16.6 ± 1.7 г/м³) экосистема озера находилась в конце стадии эвтрофии или начале гипертрофии. Наименьшая биомасса (0.7 г/м³ в июне и 2.3 г/м³ в августе) отмечена в зоне зарослей высшей водной растительности. Максимальная биомасса (22 г/м³ в июне и 32 г/м³ в августе) наблюдалась на участке, расположенном напротив г. Ростова. Эти значения биомассы близки к таковым, полученным в многоводном 2012 г. На фоне снижения максимальных величин суммарной биомассы фитопланктона в 2017 г. его доминирующий комплекс по-прежнему формировали нитчатые безгетероцистные цианобактерии из группы видов “S” типа. В июне основной доминирующий комплекс составляли цианобактерии *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *Pseudanabaena limnetica* (Lemm.) Komárek и *Aphanizomenon gracile* (Lemm.) Lemm. В августе к ним присоединились *Limnothrix planctonica* (Wołosz.) Meffert, *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb, *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronb. et Komárek, *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. и *M. wesenbergii* (Kom.) Kom.. По сравнению с предшествующими исследованиями обнаружено снижение обилия цианобактерии *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anag. et Komárek и диатомовых *Aulacoseira ambigua* (Grun.) Sim. и *A. granulata* (Ehr.) Sim. В Левском заливе, где наблюдались самые низкие численность и биомасса фитопланктона, доминировали миксотрофные фитоплагелляты (криптофитовые водоросли). Установлено многофакторное лимитирование развития фитопланктона в летний период, в том числе азотом, сульфатами и хлоридами.

Ключевые слова: озеро Неро, фитопланктон, доминирующие виды, численность, биомасса, абиотические факторы, эвтрофирование.

DOI: 10.47021/0320-3557-2020-61-73

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Неро ($57^{\circ}06' - 57^{\circ}12'$ с.ш., $39^{\circ}21' - 39^{\circ}30'$ в.д.) мелководный (средняя глубина 1.6 м, максимальная – 4.7 м) сапропелевый эвтрофно-гипертрофный водоем, расположенный в южной части Ростовской низины в бассейне Горьковского водохранилища. Толща воды озера постоянно обогащается минеральными биогенными веществами, поступающими из донных отложений. Северная часть озера подвержена сильному антропогенному воздействию за счет бытовых и промышленных стоков г. Ростова. Основные заросли макрофитов сосредоточены в южной части озера, а степень его зарастания составляет ~30% [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)]. Озеро отличается повышенной минерализацией и своеобразным гидрохимическим составом вод, что связано с характерным для бассейна оз. Неро выходом соленых вод и гидрохимических аномалий [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov

et al., 2003); Симонова и др., 2018 (Simonova et al., 2018)]. Средняя минерализация (ежемесячная с марта по октябрь 1983–1984 гг.) составляла 340 мг/л [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)]. Изучение биоты водоемов, находящихся на заключительных стадиях экологической сукцессии, когда в автотрофном звене водной экосистемы наблюдается конкуренция между фитопланктоном и высшей водной растительностью, важно для понимания причин и направления эволюции водных сообществ в ходе эвтрофирования. Последние подробные сведения о фитопланктоне оз. Неро относятся к 2012 и 2013 гг. [Отчет..., 2012, 2013 (Otchet..., 2012, 2013); Babanazarova et al., 2018)]. Поэтому задача данного исследования – дать оценку состояния фитопланктона оз. Неро в летний период в 2017 г. и связи степени развития фитопланктона с различными параметрами водной среды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на 16 станциях, расположенных по всей акватории озера (рис. 1), в июне и августе 2017 г. Для учета таксономического состава, численности и биомассы фитопланктона пробы отбирали из поверхностного слоя воды батометром Рутнера. Концентрацию фитопланктона для количественного учета водорослей осуществляли методом прямой фильтрации воды под давлением последовательно через мембранные фильтры с диаметром пор 5 мкм и 1.2 мкм. Пробы сгущали до объема 5 мл и консервировали раствором Люголя с добавлением формалина и ледяной уксусной кислоты [Методика..., 1975 (Metodika..., 1975)]. Количественная оценка проводилась с использованием световых микроскопов ММБИ-1 (ЛОМО), NU-2 и Primo Starg (Karl Zeiss). Клетки водорослей учитывали в счетной камере “Учинская-2”

объемом 0.01 или 0.02 мл. Для определения биомассы использовали обычный счетно-объемный стереометрический метод [Методика..., 1975 (Metodika..., 1975)]. Линейные размеры получали путем измерения клеток каждого встреченного организма. К доминирующим относили виды, составляющие $\geq 10\%$ от общей численности и биомассы фитопланктона. В августе 2017 г. проводили совместные исследования фитопланктона и измерения гидрохимических показателей для анализа современных связей между показателями фитопланктона и водной среды [Отчет..., 2017 (Otchet..., 2017)]. Оценку связи биотических и абиотических параметров осуществляли с помощью коэффициента детерминации для линейной регрессии и коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

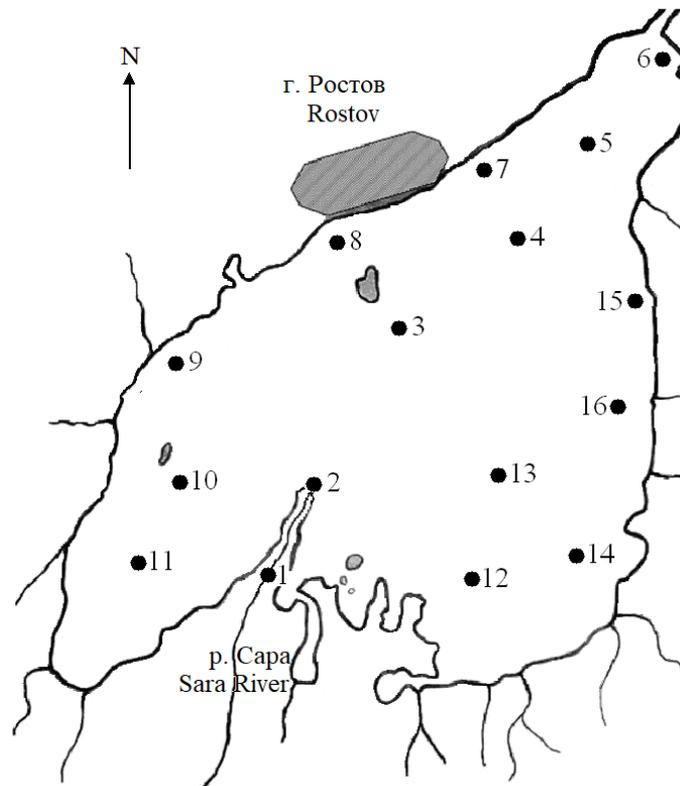


Рис. 1. Расположение станций отбора проб на оз. Неро летом 2017 г. Цифры – номера станций.

Fig. 1. Location of sampling stations on the Nero Lake in summer 2017. Digits – station numbers.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В июне 2017 г. температура в поверхностном слое воды оз. Неро варьировала от 17 до 19°C и в среднем составляла 18°C, прозрачность воды по диску Секки изменялась в пределах 20–150 см, средняя достигала 47±7 см. В августе температура и прозрачность воды повышались (табл. 1). Содержание общего фосфора и азота соответствовали концентра-

циям, характерным для эвтрофных вод [Eutrophication..., 1982; Forsberg, Ryding, 1980].

В июне 2017 г. в планктоне оз. Неро общее число таксонов водорослей рангом ниже рода в пробе варьировало от 41 до 65 (табл. 2), составляя в среднем 48±2. В августе этот показатель увеличивался в 1.3 раза и варьировал от 48 до 81, составляя в среднем 61±3. При этом соотношение числа видов различных

крупных таксономических групп водорослей в июне и в августе практически не различалось. Наибольшее разнообразие в составе фитопланктона наблюдалось среди зеленых водорослей (табл. 1): 44 и 41% в июне и августе соответственно. На втором месте стояли цианобактерии (21 и 23% от общего числа видов), на третьем – диатомовые (16 и 15%). Видовое богатство остальных таксономических групп фитопланктона в среднем не превышало 8% от суммарного числа видов в пробе.

нобактерии (21 и 23% от общего числа видов), на третьем – диатомовые (16 и 15%). Видовое богатство остальных таксономических групп фитопланктона в среднем не превышало 8% от суммарного числа видов в пробе.

Таблица 1. Изменение некоторых гидрофизических и гидрохимических параметров оз. Неро в августе 2017 г.

Table 1. Changes of some hydrophysical and hydrochemical parameters in the Lake Nero in August 2017

Статистические параметры Statistical parameters	Температура воды, °C Temperature, °C	Прозрачность, см Secchi depth, cm	P _{общ.} , мг/л TP, mg/l	N _{общ.} , мг/л TN, mg/l	N _{общ.} /P _{общ.} TN/TP	ВВ, мг/л TSM, mg/l	∑ ионов, мг/л ∑ ions, mg/l	Cl ⁻ , мг/л Cl ⁻ , mg/l	SO ₄ ²⁻ , мг/л SO ₄ ²⁻ , mg/l
Среднее Average	23.0±0.3	57±10	0.080±0.005	0.599±0.031	7.7±0.4	6.7±0.6	281±9	14.8±0.6	12.1±0.4
Мин.–макс. Min.–Max.	20.2–25.5	35–180	0.046–0.121	0.430–0.830	5.0–9.8	2.0–10.9	249–375	8.1–17.9	9.3–15.1

Примечание. ВВ – взвешенное вещество.

Note. TSM – total suspended matter.

Таблица 2. Изменение числа видов и внутривидовых таксонов в различных систематических группах фитопланктона оз. Неро в июне и августе 2017 г.

Table 2. Changes in the number of species and intraspecific taxa in various systematic phytoplankton groups of Lake Nero in June and August 2017

№ станции № station	Bacillariophyta	Cyanobacteria	Chlorophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Xanthophyta	Chryso-phyta	Всего Total
28 июня 2017 г. June 28, 2017									
1	8	9	21	4	0	0	1	1	44
2	8	8	22	7	1	1	1	2	50
3	7	9	20	4	0	2	1	1	44
4	9	11	23	4	1	2	2	1	53
5	6	11	18	4	0	1	0	1	41
6	7	12	22	4	1	1	1	0	48
7	4	9	21	4	1	2	0	0	41
8	6	9	17	2	1	1	2	3	41
9	8	15	24	4	1	2	1	1	56
10	9	14	31	5	1	1	3	1	65
11	14	3	13	7	1	2	1	2	43
1 августа 2017 г. August 1, 2017									
1	16	8	24	5	0	4	2	2	61
2	11	15	32	5	1	3	1	7	75
3	14	16	37	5	0	4	1	4	81
4	6	11	20	5	1	5	0	2	50
5	6	11	23	6	1	2	0	0	49
6	7	15	22	6	1	4		2	57
7	11	21	25	4	0	2	1	1	65
8	8	20	19	7	3	2	0	1	60
9	8	12	20	5	0	2	0	1	48
10	8	9	23	6	1	1	3	1	52
11	4	10	20	5	1	1	1	6	48

№ станции № station	Bacillariophyta	Цианобактерия	Chlorophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Xanthophyta	Chryso-phyta	Всего Total
12	9	14	36	6	1	3	0	3	72
13	12	17	30	5	1	4	1	4	74
14	11	18	24	5	1	1	0	3	63
15	8	17	22	5	1	2	0	3	58
16	9	12	24	5	1	6	1	1	59

В июне 2017 г. численность фитопланктона оз. Неро варьировала от 4 до 832 млн кл./л, составляя в среднем по озеру 446 ± 76 млн кл./л, а в августе – от 4 до 1115 млн кл./л, в среднем – 533 ± 89 млн кл./л. (табл. 3). На всех исследованных участках озера во все сроки наблюдений численно доминировали цианобактерии, которые составляли 80–98 % от общей численности фитопланктона в июне и 45–98% – в августе. Наименьшие значения численности наблюдались в р. Сара (ст. 1) и в южной части озера

(ст. 11), где присутствовали заросли макрофитов.

В июне состав доминирующих видов был достаточно однообразен и сформирован 3 видами: *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *Pseudanabaena limnetica* (Lemm.) Komárek и *Aphanizomenon gracile* (Lemm.) Lemm. (табл. 4). Иногда к ним присоединялись *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legn. Et Cronb. и *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronb. et Komárek. Последняя лидировала на станциях 1 и 11.

Таблица 3. Изменение численности (млн кл./л) различных таксономических групп фитопланктона оз. Неро в июне и августе 2017 г.

Table 3. Changes in the abundance (million cells/l) of various taxonomic groups of phytoplankton in Lake Nero in June and August 2017

№ станции № station	Bacillariophyta	Цианобактерия	Chlorophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Xanthophyta	Chryso-phyta	Общая Total
28 июня 2017 г. June 28, 2017									
1	2	18	2	0.1	0	0	0.01	0.01	22
2	2	317	3	0.9	0.1	0.03	0.1	0.3	324
3	3	511	5	0.4	0	0.1	0.1	0.1	520
4	3	566	11	0.4	0.4	0.1	0.10	0.1	580
5	5	479	6	0.3	0	0.1	0.00	0.1	490
6	2	820	10	0.2	0.05	0.1	0.05	0	832
7	4	503	16	0.4	0.1	0.2	0	0	524
8	4	567	6	0.2	0.1	0.01	0.02	0.3	577
9	3	632	14	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	649
10	3	366	12	1	0.1	0.03	0.1	0.4	382
11	0.1	3	0.2	0.5	0.01	0	0	0.03	4
1 августа 2017 г. August 1, 2017									
1	1	7	2	0.4	0	0.03	0.01	0.04	11
2	2	375	5	0.2	0.04	0.3	0.4	1	384
3	9	447	14	1.4	0	0.2	0.03	0.3	471
4	5	551	11	2	1	1	0	0.2	570
5	2	657	8	1	0.1	0.2	0	0	669
6	5	739	17	2	1	1	0	0.2	765
7	6	1084	21	1	0	1	3	0.1	1115
8	7	828	16	2	0.3	0.2	0	0.1	853
9	6	975	14	1	0	1	0	0.1	998
10	2	187	14	2	0.1	0.2	0.2	1	206
11	0.1	2	1	1	0.02	0.01	0.02	0.1	5

№ станции № station	Bacillario- phyta	Суано- bacteria	Chlo- rophyta	Crypto- phyta	Dino- phyta	Eugleno- phyta	Xantho- phyta	Chryso- phyta	Общая Total
12	1	93	7	1	0.03	0.2	0	0.2	102
13	3	368	7	1	0.03	0.2	0.03	0.3	379
14	6	360	10	2	0	0.1	0	0.3	378
15	6	553	12	2	0.1	0.1	0	1	573
16	7	1027	12	2	0.2	1	0.1	1	1049

Таблица 4. Состав доминирующих видов (по численности, млн кл./л) и их доля от общей численности (%) в оз. Неро в 2017 г.

Table 4. The composition of the dominant species (by number, million cells/l) and their share of the total number (%) in Lake Nero in 2017

№ станции № station	Доминирующие виды Dominant species
	28 июня 2017 г. June 28, 2017
1	<i>Dolichospermum</i> sp. – 12 (53%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 6 (25%)
2	<i>Limnothrix redekei</i> – 157 (49%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 83 (26%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 38 (12%)
3	<i>Aphanocapsa holsatica</i> – 59 (11%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 122 (24%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 121 (23%); <i>Limnothrix redekei</i> – 160 (31%)
4	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 369 (64%); <i>Limnothrix redekei</i> – 96 (17%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 74 (13%)
5	<i>Limnothrix redekei</i> – 178 (36%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 138 (28%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 100 (20%)
6	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 219 (26%); <i>Planktolyngbya limnetica</i> – 173 (21%); <i>Limnothrix redekei</i> – 150 (18%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 113 (14%)
7	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 199 (38%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 124 (24%); <i>Limnothrix redekei</i> – 118 (23%)
8	<i>Limnothrix redekei</i> – 195 (34%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 187 (32%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 122 (21%)
9	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 261 (40%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 167 (26%); <i>Limnothrix redekei</i> – 149 (23%)
10	<i>Limnothrix redekei</i> – 136 (36%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 87 (23%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 54 (14%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 55 (14%)
11	<i>Aphanocapsa holsatica</i> – 3 (74%)
	1 августа 2017 г. August 1, 2017
1	<i>Microcystis aeruginosa</i> – 4 (32%); <i>M. wesenbergii</i> – 3 (27%); <i>Cyclotella</i> sp. – 1 (11%)
2	<i>Limnothrix redekei</i> – 153 (40%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 69 (18%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 107 (28%)
3	<i>Limnothrix redekei</i> – 206 (44%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 50 (11%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 77 (16%)
4	<i>Limnothrix redekei</i> – 161400 (28%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 127300 (22%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 91 (16%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 86 (15%); <i>Microcystis aeruginosa</i> – 57 (10%)
5	<i>Limnothrix redekei</i> – 317 (47%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 121 (18%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 105775 (16%);
6	<i>Limnothrix redekei</i> – 308 (40%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 216 (28%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 83 (11%)
7	<i>Limnothrix redekei</i> – 580 (52%); <i>Lyngbya</i> sp. – 192 (17%)
8	<i>Limnothrix redekei</i> – 295 (35%); <i>Limnothrix planctonica</i> – 159 (19%); <i>Planktolyngbya</i> sp. – 104 (12%)
9	<i>Aphanothece bachmannii</i> – 401000 (40%); <i>Limnothrix redekei</i> – 228975 (23%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 163 (16%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 152 (15%)
10	<i>Pseudanabaena limnetica</i> – 52 (25%); <i>Limnothrix redekei</i> – 48 (23%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 39 (19%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 23 (11%)
11	<i>Planktothrix agardhii</i> – 0.9 (18%); <i>Chroomonas acuta</i> – 0.9 (18%)

№ станции № station	Доминирующие виды Dominant species
12	<i>Aphanocapsa holsatica</i> – 38 (37%); <i>Aphanothece bachmannii</i> – 20 (20%); <i>Microcystis aeruginosa</i> – 11 (11%)
13	<i>Limnothrix planctonica</i> – 98 (26%); <i>Limnothrix redekei</i> – 93 (24%); <i>Planktolyngbya</i> sp. – 80 (21%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 38 (10%)
14	<i>Planktolyngbya</i> sp. – 98 (26%); <i>Limnothrix redekei</i> – 91 (24%); <i>Limnothrix planctonica</i> – 44 (12%)
15	<i>Limnothrix redekei</i> – 192 (33%); <i>Limnothrix planctonica</i> – 97 (17%); <i>Planktolyngbya</i> sp. – 89 (16%); <i>Planktolyngbya limnetica</i> – 67 (12%)
16	<i>Planktolyngbya limnetica</i> – 543 (52%); <i>Aphanocapsa holsatica</i> – 135 (13%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 128 (12%); <i>Limnothrix redekei</i> – 108 (10%)

В августе состав доминирующих видов был более разнообразным, но, по-прежнему, практически на всех участках (75–81% случаев) лидировал *Limnothrix redekei*. К июньским доминантам прибавились *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergii* (Kom.) Kom., *Limnothrix planctonica* (Wolosz.) Meffert, *Planktolyngbya limnetica*, *Aphanothece bachmannii* Kom.-Legner. et Cronb. и *Planktolyngbya* sp. Ценоотическим своеобразием отличался фитопланктон р. Сары (ст. 1), где наряду с цианобактериями *Microcystis aeruginosa* и *M. wesenbergii* лидировала диатомея – *Cyclotella* sp., и фитопланктон ст. 11, где кроме цианобактерии *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anag. et Komárek преобладала криптомонада – *Chroomonas acuta* Utermöhl.

Суммарная биомасса фитопланктона оз. Неро была очень высокой (табл. 5) и варьировала в июне от 0.7 до 22.5 г/м³, в среднем составляя 14.2±2.1 г/м³, а в августе – от 2.3 до 32.9 г/м³, в среднем – 18.3±2.4 г/м³. По среднему значению биомассы в июне и августе (16.6±1.7 г/м³) тип озера по-прежнему оставался высокотрофным и может рассматриваться как водоем, находящийся в заключительной стадии эвтрофии или начальной стадии гипертрофии [Китаев, 2007 (Kitaev, 2007)]. Наименьшие значения биомассы наблюдались в р. Сара (ст. 1) и в южной части озера (ст. 11 и 12), где присутствовали заросли макрофитов. Наибольшая биомасса отмечена на станциях 7 и 8, расположенных около г. Ростова.

Таблица 5. Изменение биомассы (г/м³) различных таксономических групп фитопланктона оз. Неро в 2017 г.

Table 5. Changes in biomass (g/m³) of different taxonomic groups of phytoplankton in Lake Nero in 2017

№ станции № station	Bacillariophyta	Cyanobacteria	Chlorophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Xanthophyta	Chryso- phyta	Общая Total
28 июня 2017 г. June 28, 2017									
1	0.4	0.9	0.4	0.1	0	0	0.004	0.001	1.8
2	1.3	6.7	0.5	0.6	0.1	0.04	0.01	0.03	9.3
3	3.6	9.5	1.2	0.4	0	0.4	2.1	0.01	17.1
4	7.1	8.7	2	0.2	0.8	0.3	0.03	0.1	19.2
5	3.4	12.2	1.5	0.7	0	0.1	0	0.1	17.9
6	3.1	12.2	1.6	0.2	0.1	0.1	0.04	0	17.3
7	2.2	9.5	3.3	0.4	0.3	0.3	0	0	15.8
8	2.3	10.5	0.9	0.1	2.5	0.02	0.2	0.1	16.5
9	1.8	11.6	2.7	0.2	1.4	0.2	0.1	0.01	17.9
10	7.4	7.4	5.4	0.8	1.1	0.1	0.4	0.1	22.5
11	0.1	0.02	0.1	0.5	0.03	0.002	0.01	0.01	0.7
1 августа 2017 г. August 1, 2017									
1	0.9	0.8	0.4	0.1	0	0.1	0.01	0.01	2.3
2	1.3	14.4	1.2	0.2	0.2	0.7	0.2	0.5	18.7
3	2.7	18.3	2.6	0.8	0	0.5	0.1	0.2	25.0
4	1.6	14.2	3.1	1.8	2.6	3.0	0	0.2	26.4
5	0.9	12.6	2.6	0.4	0.8	0.1	0	0	17.4
6	2.6	12.5	3.8	1.9	3.2	4.4	0	0.1	28.4
7	2.2	23.1	4.5	0.8	0	2.0	0.3	0.1	32.9
8	3.7	20.7	2.6	3.7	0.6	0.3	0	0.2	31.8

№ станции № station	Bacillariophyta	Cyanobacteria	Chlorophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Xanthophyta	Chryso- phyta	Общая Total
9	4.5	8.5	2.5	0.7	0	2.2	0	0.04	18.5
10	1.9	3.3	2.6	1.4	0.3	2.3	0.2	0.1	11.3
11	0.02	0.1	0.3	2.2	0.1	0.02	0.03	0.2	3.0
12	0.4	1.9	1.3	0.8	0.2	0.5	0	0.05	5.0
13	0.9	8.3	1.3	1.6	0.1	0.8	0.01	0.4	13.4
14	2.9	10.1	2.1	1.5	0.04	0.2	0	0.3	17.2
15	2.5	12.9	2.5	1.3	1.4	0.6	0	0.5	21.8
16	1.9	11.7	1.8	1.0	1.4	1.6	0.04	0.1	19.6

В июне 2017 г. по биомассе, как и численно, в 82% случаев доминировала нитчатая цианобактерия *Limnothrix redekei* (табл. 6). Вместе с ней чаще всего преобладали *Pseudanabaena limnetica* и *Aphanizomenon gracile*. Только в фитопланктоне р. Сара (ст. 1) лидировал *Dolichospermum* sp. В отдельных случаях

цианобактерий сопровождали диатомеи *Aulacoseira ambigua*, *Gyrosigma* sp. и *Cymatopleura solea*, а на ст. 3 из желтозеленых – *Tetraedriella regularis*, на ст. 8 из динофитовых – *Peridinium* sp. Лишь на ст. 11 преобладали криптозоаны из рода *Cryptomonas*.

Таблица 6. Состав доминирующих видов (по биомассе, г/м³) и их доля от общей биомассы (%) в оз. Неро в 2017 г.

Table 6. The composition of the dominant species (by biomass, g/m³) and their share of the total biomass (%) in Lake Nero in 2017

№ станции № station	Доминирующие виды Dominant species
	28 июня 2017 г. June 28, 2017
1	<i>Dolichospermum</i> sp. – 0.7 (42%);
2	<i>Limnothrix redekei</i> – 3.9 (42%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 1.2 (13%); <i>Aulacoseira ambigua</i> (Grun.) Sim. – 1.0 (11%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 0.9 (11%)
3	<i>Limnothrix redekei</i> – 4.0 (24%); <i>Tetraedriella regularis</i> (Kütz.) Fott – 2.0 (12%); <i>Gyrosigma</i> sp. – 2.5 (14%)
4	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 4.6 (24%); <i>Cymatopleura solea</i> (Bréb.) W. Smith – 3.1 (16%); <i>Limnothrix redekei</i> – 2.4 (13%)
5	<i>Limnothrix redekei</i> – 4.5 (25%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 3.9 (22%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 1.9 (11%)
6	<i>Limnothrix redekei</i> – 3.8 (22%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 3.4 (20%); <i>Microcystis aeruginosa</i> – 2.3 (13%)
7	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 3.1 (20%); <i>Limnothrix redekei</i> – 2.9 (19%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 1.8 (11%)
8	<i>Limnothrix redekei</i> – 4.9 (30%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 2.6 (16%); <i>Peridinium</i> sp. – 2.5 (15%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 1.9 (12%)
9	<i>Aphanizomenon gracile</i> – 4.1 (23%); <i>Limnothrix redekei</i> – 3.8 (21%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 2.4 (13%)
10	<i>Pinnularia</i> sp. – 3.3 (15%); <i>Limnothrix redekei</i> – 3.4 (15%)
11	<i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja – 0.3 (41%); <i>C. cf. parapyrenoidifera</i> Skuja – 0.1 (11%)
	1 августа 2017 г. August 1, 2017
1	<i>Melosira varians</i> Ag. – 0.6 (25%); <i>Microcystis aeruginosa</i> – 0.4 (18%); <i>M. wesenbergii</i> – 0.3 (15%); <i>Scenedesmus magnus</i> Meyen – 0.3 (12%)
2	<i>Limnothrix redekei</i> – 8.7 (46%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.4 (13%)
3	<i>Limnothrix redekei</i> – 11.6 (47%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.7 (11%)
4	<i>Microcystis aeruginosa</i> – 6.4 (24%); <i>Limnothrix redekei</i> – 4.1 (15%)
5	<i>Limnothrix redekei</i> – 7.9 (46%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.1 (12%)
6	<i>Limnothrix redekei</i> – 7.7 (27%); <i>Euglena</i> sp. – 3.4 (12%); <i>Peridinium</i> sp. – 3.2 (11%)
7	<i>Limnothrix redekei</i> – 14.6 (44%)
8	<i>Limnothrix redekei</i> – 10.2 (32%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 3.1 (10%)
9	<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Sim. – 2.9 (16%); <i>Microcystis aeruginosa</i> – 2.0 (11%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 3.2 (17%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.6 (14%)

№ станции № station	Доминирующие виды Dominant species
10	<i>Limnothrix redekei</i> – 1.2 (11%)
11	<i>Cryptomonas sp.</i> – 0.9 (30%); <i>Cryptomonas sp.</i> – 0.5 (16%); <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.– 0.3 (11%)
12	<i>Microcystis aeruginosa</i> – 1.2 (25%);
13	<i>Limnothrix redekei</i> – 3.2 (24%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.2 (16%); <i>Pseudanabaena limnetica</i> – 1.5 (11%)
14	<i>Limnothrix redekei</i> – 3.1 (18%); <i>Microcystis wesenbergii</i> – 2.4 (14%)
15	<i>Limnothrix redekei</i> – 6.6 (30%); <i>Aphanizomenon gracile</i> – 2.3 (11%)
16	<i>Planktolyngbya limnetica</i> – 5.1 (26%); <i>Limnothrix redekei</i> – 2.7 (14%)

В августе структуру биомассы фитопланктона в 75% случаев определял также *Limnothrix redekei*. В разгар лета наряду с июньскими доминантами (*Limnothrix redekei*, *Pseudanabaena limnetica* и *Aphanizomenon gracile*) из цианобактерий лидировали *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *Limnothrix planctonica*, *Planktolyngbya limnetica*, из динофитовых – *Peridinium sp.*, из эвгленовых – *Euglena sp.*. Свообразием доминантного комплекса отличался фитопланктон р. Сары, где наряду с цианобактериями из рода *Microcystis* преобладали диатомеи – *Melosira varians* и зеленые – *Scenedesmus magnus*, и фитопланктон на ст. 11, где структурообразующими видами были жгутиковые – криптомонады.

Сравнение полученных данных с предшествующим периодом исследования (конец 1980-х – начало 1990-х и конец 1990-х – начало 2000-х) [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)] показало, что характер распределения

фитопланктона по акватории озера сохраняется прежним – наибольшее развитие наблюдается в северной части озера с максимумом около г. Ростова, наименьшее – в южной, где расположены основные заросли макрофитов. Из всех исследованных участков, как и в предыдущие годы, выделялась ст. 11, расположенная в Левском заливе, где наблюдались самые низкие численность и биомасса фитопланктона и доминирование миксотрофных фитопланктонов (криптофитовых водорослей). По значениям биомассы фитопланктона оз. Неро по-прежнему можно классифицировать как эвтрофный водоем. Однако максимальная биомасса фитопланктона, 22 г/м³ – в июне и 32 г/м³ – в августе, была существенно ниже таковой в предшествующий период исследований и близка к ее значениям, полученным в многоводном 2012 г. (табл. 7) [Состояние..., 2008 (The state..., 2008); Отчет..., 2012 (Otchet..., 2012)].

Таблица 7. Многолетнее изменение максимальной общей биомассы фитопланктона и цианобактерий

Table 7. Long-term change in the maximum of phytoplankton total biomass and cyanobacteria

Годы / Years	1987–1991	1999–2004	2005–2007	2009–2011	2012	2017
Максимальная общая биомасса фитопланктона, г/м ³ Maximum total phytoplankton biomass, g/m ³	68	58	63	47	28	33
Максимальная биомасса цианобактерий, % Maximum biomass of cyanobacteria, %	54	43	93	93	73	77
Максимальная биомасса “планктотрихетового” комплекса, % Maximum biomass of the “planktotrichet” complex, %	–	63	89	59	31	47

В составе фитопланктона в июне и августе, как и в предшествующий период, доминировали цианобактерии, составлявшие в среднем 53% от суммарной биомассы фитопланктона. Преобладали в основном три вида: *Limnothrix redekei*, *Pseudanabaena limnetica* из “планктотрихетового” комплекса и *Aphanizomenon gracile*, входившие в состав доминантов в 1999–2004 гг. Первые стали определять облик фитопланктона оз. Неро с 2003 г., когда началось поднятие и поддержание уровня во-

ды за счет плотины, что способствовало снижению водообмена [Отчет..., 2012 (Otchet..., 2012)]. В 2017 г. значительно сократилось участие летних форм диатомей *Aulacoseira ambigua* и *A. granulata*. Первая в 2017 г. доминировала только на одной ст. № 2 в июне в отличие от 1999–2004 гг., когда ее лидерство отмечали почти в 30% случаев. Из доминантов практически исчезла *Planktothrix agardhii*. Максимальная относительная биомасса и частота доминирования *Limnothrix redekei* остались на

прежнем уровне [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)], так же как и *Aphanizomenon gracile*. Таким образом, на фоне снижения максимальных значений суммарной биомассы фитопланктона в 2017 г., вклад в суммарную биомассу цианобактерий по-прежнему был очень высок и формировался обычным комплексом видов осцилляториевых, из которого выпал *Planktothrix agardhii*. Снижение вклада этой группы цианобактерий в общую биомассу фитопланктона, которое началось в 2012 г., продолжилось в 2017 г.

Анализ статистических связей между суммарными численностью и биомассой фитопланктона и абиотическими параметрами показал (табл. 8), что численность фитопланктона положительно связана с сульфатами, количеством взвешенного вещества и ХПК, а биомасса, кроме того, с общим азотом, БПК и хлоридами. Отрицательная связь прослеживалась между численностью, биомассой фитопланктона и прозрачностью воды, аммоний-

ным азотом, общей суммой ионов, кальцием и карбонатами. Полученные результаты показали, что в летний период рост фитопланктона в высокотрофном оз. Неро лимитировали количество взвешенного и органического вещества, содержание азота, сульфатов и хлоридов в воде. Обратная линейная связь между показателями обилия фитопланктона и прозрачностью воды свидетельствовали о том, что степень развития фитопланктона значительно влияла на условия подводного светового режима. В предшествующих исследованиях такая же зависимость получена между прозрачностью и концентрацией хлорофилла [Babanazarova et al., 2018]. В 2017 г. наибольшая прозрачность воды (75–180 см) и наименьшее развитие фитопланктона (численность 4–22 млн кл./л, биомасса 0.7–4.9 г/м³) наблюдались на ст. 1, 11 и 12, расположенных в южной части озера, где сосредоточены заросли высшей водной растительности.

Таблица 8. Параметры статистических связи общей численности и биомассы фитопланктона с некоторыми абиотическими показателями в оз. Неро в августе 2017 г.

Table 8. The parameters of the statistical relationship between of total abundance and biomass of phytoplankton and some abiotic parameters in Lake Nero in August 2017

Абиотические показатели Abiotic parameters	Коэффициент ранговой корреляции Спирмена Spearman's rank correlation coefficient	Параметры линейной регрессии Parameters of linear regression		
		R^2	F	p
Общая численность, млн кл./л Total abundance, million cells/l				
Прозрачность, см Secchi depth, cm	-0.90	-0.69	11.8	0.004
NH ₄ ⁺ , мг/л NH ₄ ⁺ , mg/l	-0.67	-0.70	13.2	0.003
BB, мг/л	0.53	–	–	–
TSM, мг/л	0.80	–	–	–
ХПК, мг O ₂ /л COD, mg O ₂ /l				
∑ ионов, мг/л ∑ of ions, mg/l	-0.69	–	–	–
Ca ²⁺ , мг/л Ca ²⁺ , mg/l	-0.66	-0.77	20.5	0.0005
HCO ₃ ⁻ , мг/л HCO ₃ ⁻ , mg/l	–	-0.74	17.24	0.0009
SO ₄ ²⁻ , мг/л SO ₄ ²⁻ , mg/l	0.64	0.65	10.41	0.006
Общая биомасса, г/м ³ Total biomass, g/m ³				
Прозрачность, см Secchi depth, cm	-0.79	-0.62	8.56	0.01
NH ₄ ⁺ , мг/л NH ₄ ⁺ , mg/l	-0.54	-0.62	8.56	0.01
N _{общ.} , мг N/л TN, mgN/l	0.52	0.54	5.77	0.03
BB, мг/л	0.55	0.63	9.22	0.009
TSM, мг/л	0.76	0.92	33.38	0.001

Абиотические показатели Abiotic parameters	Коэффициент ранговой корреляции Спирмена Spearman's rank correlation coefficient	Параметры линейной регрессии Parameters of linear regression		
		R^2	F	p
БПК ₅ , мг O ₂ /л BOD, mg O ₂ /l				
∑ ионов, мг/л ∑ of ions, mg/l	-0.77	-0.79	23.59	0.0002
Ca ²⁺ , мг/л Ca ²⁺ , mg/l	-0.86	-0.88	46.2	0.0000
HCO ₃ ⁻ , мг/л HCO ₃ ⁻ , mg/l	-0.83	-0.83	30.3	0.00008
SO ₄ ²⁻ , мг/л SO ₄ ²⁻ , mg/l	0.72	0.78	22.26	0.0003
Cl ⁻ , мг/л Cl ⁻ , mg/l	–	0.51	5.11	0.04

Примечание. ВВ – взвешенное вещество, R^2 – коэффициент детерминации, F – критерий Фишера, p – уровень значимости, прочерк – отсутствие достоверной связи.

Note. TSM – total suspended matter, R^2 – coefficient of determination, F – Fisher's criterion, p – significance level, dash – lack of reliable dependence.

Фитопланктон – многокомпонентное сообщество, развитие которого обусловлено комплексом абиотических факторов и биотических взаимодействий. В водной экологии существуют два представления о лимитирующих факторах: принцип лимитирования Либиха (когда лимитирует один или два фактора), который применим только для стационарно сбалансированных экосистем, и принцип мультипликативного лимитирования, который воспроизводит многофакторную зависимость развития фитопланктона. Для природных лимнических сообществ последнее более приемлемо. Наиболее важными компонентами минерального питания водорослей, определяющими степень развития фитопланктона, продуцирования органического вещества и трофии водоема, являются биогенные элементы – фосфор и азот. В пресных водоемах в лимитировании процесса эвтрофирования признана главная роль фосфора, что позволило построить эмпирические зависимости и математические модели. В них отражена связь показателей, характеризующих трофический статус водоема со значениями поступлений в него общего фосфора. В 1960–1970-е гг. были установлены положительные статистические связи между общим фосфором и хлорофиллом *a* [Schindler, 1977].

Длительные исследования на оз. Неро в 2004–2008 гг. показали, что концентрация хлорофилла “а” в озере, которая тесно положительно скоррелирована с общей биомассой фитопланктона, имеет отрицательную связь с прозрачностью воды и положительную с температурой, концентрацией нитратного

азота и минерального фосфора [Сиделев, 2010 (Sidelev, 2010)]. Это удовлетворяет условиям новой парадигмы N и P лимитирования в озерах, которая разрабатывается в последние три десятилетия. На начальных этапах эвтрофирования развитие фитопланктона лимитирует фосфор, с ростом трофии водоема – фосфор и азот и на заключительных стадиях эвтрофирования и увеличения органического загрязнения – азот. В частности, азот лимитирует фитопланктон в сточных водах [Даценко, 2007 (Datsenko, 2007)].

Доминирование в фитопланктоне оз. Неро нитчатых безгетероцистных цианобактерий, таких как *Limnothrix redekei*, *Pseudanabaena limnetica* и *Planktolyngbya limnetica* из группы видов “S” типа [Reynolds et al., 2002], свидетельствует о том, что сукцессию фитопланктона в этом направлении детерминировали повышение концентрации азота, температуры воды, ухудшение условий подводной освещенности и снижение проточности озера за счет повышения уровня воды [Babanazarova et al., 2018]. Согласно морфофункциональной классификации пресноводного фитопланктона К. Рейнольдса [Reynolds et al., 2002] эта группа водорослей предпочитает высокую концентрацию азота, низкие освещенность и проточность (подвижность) воды.

Увеличение долевого участия безгетероцистных цианобактерий обычно прослеживается в фитопланктоне в условиях азотного лимитирования [Zevenboom, Mur, 1980]. Снижению проточности в оз. Неро способствовало строительство плотины и начало повышения уровня воды в конце 1980-х гг. [Отчет..., 2012

(Otchet..., 2012)]. Его повышение связано также с ростом количества осадков, которое наблюдается на территории РФ в последние десятилетия [Второй..., 2014 (Vtoroy..., 2014)]. Вслед за этим в оз. Неро было отмечено и увеличение концентрации нитратного азота и снижение прозрачности воды [Сиделев, 2010 (Sidelev, 2010)]. Рост содержания нитратов в последние десятилетия прослеживался во многих европейских реках и озерах [George et al., 2010; Jeppesen et al., 2010]. Их наибольшая концентрация в сезонном цикле озер и водохранилищ наблюдается обычно зимой и весной [Степанова и др., 2008 (Stepanova et al. 2008); George et al., 2010], что обусловлено поверхностным стоком. Объем потока растворенных неорганических веществ с водосбора определяется, прежде всего, температурой воздуха и влажностью почвы, которые непосредственно связаны с климатическими факторами. Увеличение количества осадков способствуют увеличению потока растворенного неорганического азота зимой и ранней весной [Mooge et al., 2010]. В Ивановском водохранилище отмечена высокая чувствительность к водному стоку содержания нитратного азота, концентрация которого определяется весной не столько объемом половодья, а сколько условиями снеготаяния [Былинкина и др., 1982 (Bylinkina et al., 1982)]. К колебаниям речного стока чувствительны сульфаты и хлорный коэффициент (соотношение общей суммы ионов и содержания ионов хлора) [Скороход, Цыцарин, 1995 (Skorokhod, Tsytsarin, 1995)]. Исходя из этого, изменение условий обитания в оз. Неро, связанных как с антропогенным, так и климатическим воздействиями, способ-

ствовало стабильному росту специфической группы цианобактерий – теневыносливых неазотфиксаторов из группы видов “S” типа. Регулировать азотфиксацию в воде может также содержание сульфатов [Howarth et al., 1988], которые подавляя ассимиляцию молибдатов, могут ингибировать нитрогеназную активность цианобактерий. Именно этим объясняется преобладание безгетероцистных цианей в эстуариях, морях и соленых пресных озерах, где наблюдается низкое соотношение азота и фосфора. Полагают, что постепенное увеличение их разнообразия и обилия в водохранилищах Волги может быть связано с ростом концентрации сульфатов [Корнева, 2015 (Korneva, 2015)]. В оз. Неро среднее соотношение N:P в августе 2017 г. было <10:1 (табл. 1) [Отчет..., 2017 (Otchet..., 2017)], что указывало на N лимитирование [Smith, 1982]. Исходя из вышеизложенного и положительной связи степени развития фитопланктона с сульфатами и хлоридами, не исключено, что доминирование в фитопланктоне оз. Неро видов “S” типа обусловлено не только повышением уровня воды, но и изменением вслед за этим соотношения анионов в ионном составе воды в результате увеличения поступления сульфатов и хлоридов с водосбора в многоводную фазу. К сожалению, сведения о многолетнем изменении концентрации сульфатов и хлоридов в оз. Неро отсутствуют [Симонова и др., 2018 (Simonova et al. 2018)]. Многофакторное лимитирование чаще наблюдается в более коротких временных масштабах, когда ожидается совместное ограничение несколькими питательными веществами [Sternner, 2008].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в летний период 2017 г. в оз. Неро численность фитопланктона изменялась от 4 млн кл./л до 1.1 млрд кл./л, а биомасса от 0.7 до 33 г/м³. По среднему значению биомассы (16.6±1.7 г/м³) статус озера по-прежнему оставался высокотрофным. Экосистема водоема находилась в заключительной фазе эвтрофии или начальной – гипертрофии. Наименьшее развитие фитопланктона прослеживалось в южной части озера, где расположены основные заросли макрофитов. По срав-

нению с предшествующим периодом исследований выявлено снижение обилия *Planktothrix agardhii*, одного из представителей теневыносливых безгетероцистных видов группы “S” типа, а также летних форм диатомовых водорослей – *Aulacoseira ambigua* и *A. granulata*. Установлено многофакторное лимитирование роста фитопланктона количеством взвешенного и органического веществ, содержанием азота, сульфатов и хлоридов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания №АААА-А18-118012690096-1 и при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-04-01069а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. 190 с.

- Былинкина А.А., Трифонова Н.А., Кудрявцева Н.А., Калинина Л.А., Генкал Л.Ф. Гидрохимический режим Шекснинского водохранилища и водоемов Северо-Двинской системы // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л.: Наука, 1982. С. 45–76.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.
- Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
- Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2007. 395 с.
- Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 239 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе “Изучение гидрохимических и гидробиологических особенностей озера Неро”, гос. контракт №11 от 26 июня 2012 г. Ярославль, 2012. 83 с.
- Отчет по построению регрессионных моделей состояния озера Неро и выработке рекомендаций по сохранению его экосистемы, гос. контракт № 11 от 25 мая 2013 г. Ярославль, 2013. 121 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе “Комплекс мероприятий по анализу состояния озера Неро и необходимости проведения работ по его комплексной экологической реабилитации”. Государственный контракт от 22 июня 2017 года № 19 № госрегистрации 1320/02–232.1. Санкт-Петербург, 2017. 353 с.
- Сиделев С.И. Сукцессия фитопланктона высокоэвтрофного озера Неро. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Борок, 2010. 25 с.
- Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис, и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Т. 93. С. 40–74.
- Скорород А.И., Цыцарин А.Г. Изменение солевого состава Среднего и Южного Каспия за период инструментальных наблюдений // Водные ресурсы. 1995. Т. 22, № 1. С. 101–109.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. 406 с.
- Степанова И.Э., Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М. Биогенные элементы в Рыбинском водохранилище на современном этапе // Актуальные проблемы экологии Ярославской области. Вып. 4. Т. 1. Ярославль: издание ВВО РЭА, 2008. С. 213–218.
- Babanazarova O.V., Sidelev S.I., Ovseenko A.S., Korovkina K.P., Zhdanova S.M., Litvinov A.S. Water level in a shallow highly eutrophic lake: development factor by macrophyte or phytoplankton type: case study of lake Nero, Yaroslavl oblast // Water Resources. 2018. Vol. 45. № 6. P. 897–907. DOI: 10.1134/S0097807818060027
- Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development 1982. 154 p.
- Forsberg C., Ryding S.O. Eutrophication Parameters and Trophic State Indices in 30 Swedish Waste-Receiving Lakes // Archiv für Hydrobiologie. 1980. Vol. 89. P. 189–207.
- George G., Järvinen M., Nöges T., Blenckner T., Moore K. The impact of the Changing Climate on the Supply and Recycling of Nitrate // The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series, 2010. Vol. 4. P. 161–178. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_10
- Howarth R., Marino R., Cole J. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls // Limnol. Oceanogr. 1988. Vol. 33. № 4. Part 2. P. 688–701. DOI: 10.4319/lo.1988.33.4_part_2.0669
- Jeppesen E., Moss B., Bennion H., Carvalho L., DeMeester L., Feuchtmayr H., Friberg N., Gessner M.O., Hefting M., Lauridsen T.L., Liboriussen L., Malmquist H.J., May L., Meerhoff M., Olafsson J.S., Soons M. B., Verhoeven J.T.A. Interaction of Climate Change and Eutrophication // Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems (Eds. Kernan M., Battarbee R. and Moss B.). Blackwell Publishing Ltd. 2010. P. 119–151. DOI: 10.1002/9781444327397.ch6
- Moore K., Jennings E., Allott N., May L., Järvinen M., Arvola L., Tamm T., Järvet A., Nöges T., Pierson D., Schneiderman E. Modelling the Effects of Climate Change on the Supply of Inorganic Nitrogen // The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series, Vol. 4 (Ed. G. George). Springer-Verlag. 2010. P. 179–197. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_11
- Reynolds C., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // J. Plankton Res. 2002. Vol. 24. P. 417–428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417
- Schindler D. Evolution of Phosphorus Limitation in Lakes // Science. 1977. Vol. 195. P. 260–262. DOI: 10.1126/science.195.4275.260
- Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis // Limnology and Oceanography. 1982. Vol. 27 (6). P. 1101–1112. DOI: 10.4319/lo.1982.27.6.1101
- Sterner R. W. On the Phosphorus Limitation Paradigm for Lakes // Hydrobiology. 2008. Vol. 93. Iss. 4–5. P. 433–445. DOI: 10.1002/iroh.200811068
- Zevenboom W., Mur L.R. N₂-fixing cyanobacteria: Why they do not become dominant in Dutch hypertrophic lakes // In Barica Z.N. J. and Mur L.R. eds. Hypertrophic ecosystems. Junk, den Haag, 1980. P. 123–130. DOI: 10.1007/978-94-009-9203-0_14

REFERENCES

- Babanazarova O.V., Sidelev S.I., Ovseenko A.S., Korovkina K.P., Zhdanova S.M., Litvinov A.S. 2018. Water level in a shallow highly eutrophic lake: development factor by macrophyte or phytoplankton type: case study of lake Nero, Yaroslavl oblast. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no 6, pp. 897–907. doi: 10.1134/S0097807818060027
- Bikbulatov E.S., Bikbulatova Ye.M., Litvinov A.S., Poddubnyy S.A. *Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero*. Rybinsk: Rybinskiy Dom pečati, 2003. 190 p. (In Russian)
- Bylinkina A.A., Trifonova N.A., Kudryavtseva N.A., Kalinina L.A., Genkal L.F. Ecological studies of reservoirs of the Volga-Baltic and North-Dvinsk water systems. *Gidrokhimicheskiy rezhim Sheksninskogo vodokhranilishcha i vodozemov Severo-Dvinskoy sistemy* [Hydrochemical regime of the Sheksna reservoir and reservoirs of the North-Dvina system]. Leningrad, Nauka, 1982, pp. 45–76. (In Russian)
- Datsenko Yu.S. *Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects*. Moscow: GEOS, 2007. 252 p. (In Russian)
- Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1982. 154 p.
- Forsberg C., Ryding S.O. Eutrophication Parameters and Trophic State Indices in 30 Swedish Waste-Receiving Lakes. *Arch. Hydrobiol.*, 1980, vol. 89, pp. 189–207.
- George G., Järvinen M., Nöges T., Blenckner T., Moore K. The impact of the Changing Climate on the Supply and Recycling of Nitrate. *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series*, 2010, vol. 4, pp. 161–178. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_10
- Howarth R., Marino R., Cole J. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls. *Limnol. Oceanogr.*, 1988, vol. 33. no. 4, part 2, pp. 688–701. doi: 10.4319/lo.1988.33.4_part_2.0669
- Jeppesen E., Moss B., Bennion H., Carvalho L., DeMeester L., Feuchtmayr H., Friberg N., Gessner M.O., Heffting M., Lauridsen T.L., Liboriussen L., Malmquist H.J., May L., Meerhoff M., Olafsson J.S., Soons M. B., Verhoeven J.T.A. Interaction of Climate Change and Eutrophication. *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems* (Eds. Kernan M., Battarbee R. and Moss B.). Blackwell Publishing Ltd., 2010, pp. 119–151. doi: 10.1002/9781444327397.ch6
- Kitaev S.P. *Basics of limnology for hydrobiology and ichthyology*. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyj centr RAN, 2007. 395 p. (In Russian)
- Korneva L.G. *Phytoplankton of Volga River basin reservoirs*. Kostroma: Kostromskoj pečatnyj dom, 2015. 284 p. (In Russian)
- Metodika izucheniya biogeocenozov vnutrennih vodozemov* [Methods of study of inland waters biogeocoenosis]. Moscow: Nauka, 1975. 239 p. (In Russian)
- Moore K., Jennings E., Allott N., May L., Järvinen M., Arvola L., Tamm T., Järvet A., Nöges T., Pierson D., Schneiderman E. Modelling the Effects of Climate Change on the Supply of Inorganic Nitrogen. *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series*. Vol. 4 (Ed. G. George). Springer-Verlag. 2010, pp. 179–197. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_11
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote "Izucheniye gidrokhimicheskikh i gidrobiologicheskikh osobennostey ozera Nero"*, gos. kontrakt №11 ot 26 iyunya 2012 g [Report on research work "Study of hydrochemical and hydrobiological features of Lake Nero", state. contract no. 11 dated June 26, 2012]. Yaroslavl'. 83 p. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote "Kompleks meropriyatiy po analizu sostoyaniya ozera Nero i neobkhodimosti provedeniya rabot po yego kompleksnoy ekologicheskoy reabilitatsii"*. Gosudarstvennyy kontrakt ot 22 iyunya 2017 goda № 19 № gosregistratsii 1320/02–232.1 [Report on research work "A set of measures to analyze the state of Lake Nero and the need to carry out work on its comprehensive environmental rehabilitation." State contract dated June 22, 2017 no 19 State registration no 1320 / 02–232.1.]. 353 p. (In Russian)
- Otchet po postroyeniyu regressionnykh modeley sostoyaniya ozera Nero i vyrabotke rekomendatsiy po sokhraneniyu yego ekosistemy*, gos. kontrakt № N 11 ot 25 maya 2013 g [Report on the construction of regression models of the state of Lake Nero and the development of recommendations for the preservation of its ecosystem, state. contract no 11 dated May 25, 2013]. Yaroslavl'. 121 p. (In Russian)
- Reynolds C., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 2002, vol. 24. pp. 417–428. doi: 10.1093/plankt/24.5.417
- Schindler D. Evolution of Phosphorus Limitation in Lakes. *Science*. 1977, vol. 195. pp. 260–262. doi: 10.1126/science.195.4275.260
- Sidelev S.I. 2010. Suktsessiya fitoplanktona vysokoevtrofnogo ozera Nero. *Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. Diss.* Borok, 25 p. (In Russian)
- Simonova Ju.V., Rusakov A.V., Rjumin A.G. Salt-affected soils of the Rostov Lowland (Yaroslavl' region): morphology, genesis and dynamics of salinization in the annual hydrological cycle, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, vol. 93, pp. 40–74. doi: 10.19047/0136-1694-2018-93-40-74 (In Russian)
- Skorokhod A.I., Tsytarin A.G. Changes in the salt composition of the Middle and South Caspian over the period of instrumental observations. *Vodnyye resursy*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 101–109. (In Russian)
- Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnology and Oceanography*, 1982, vol. 27 (6). pp. 1101–1112. doi: 10.4319/lo.1982.27.6.1101
- Sostoyanie ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka* [The state of the ecosystem of Lake Nero at the beginning of the XXI century]. Moscow: Nauka, 2008. 406 p. (In Russian)

- Stepanova I.E., Bikbulatov E.S., Bikbulatova Ye.M. Biogenic elements in the Rybinsk reservoir at the present stage. *Aktual'nyye problemy ekologii Yaroslavskoy oblasti* [Actual problems of ecology of the Yaroslavl region]. Yaroslavl', Izd. VVO REA. 2008, issue 4. vol. 1, pp. 213–218. (In Russian)
- Sterner R. W. On the Phosphorus Limitation Paradigm for Lakes. *Hydrobiology*, 2008, issue 4–5, vol. 93, pp. 433–445. doi: 10.1002/iroh.200811068
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. *Obshcheye rezyume* [The second assessment report of Roshydromet on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. Moscow: Rosgidromet, 2014, 61 p. (In Russian)
- Zevenboom W., Mur L.R. N₂-fixing cyanobacteria: Why they do not become dominant in Dutch hypertrophic lakes. *Hypertrophic ecosystems* (Eds. Barica Zn. J. and Mur L.R.). Junk, den Haag, 1980, pp. 123–130. doi: 10.1007/978-94-009-9203-0_14

PHYTOPLANKTON AND WATER QUALITY OF LAKE NERO IN SUMMER 2017

L. G. Korneva¹, I. V. Mitropolskaya¹, S. I. Sidelev², V. V. Solovyeva¹,
E. G. Sakharova¹, O. S. Makarova¹

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,
Borok, Nekouzski raion, Yaroslavl oblast, 152742, Russia e-mail: korneva@ibiw.ru*

²*Yaroslavl State University, Matrosova, 9, Yaroslavl, 150057, Russia*

Data on the number, biomass and phytoplankton dominant species of the sapropel shallow-water high-trophic Nero Lake (Russia, Yaroslavl region, 57°06'–57°12' N, 39°21'–39°30' E) in June and August 2017 are presented. Spatial heterogeneity of phytoplankton were studied in the lake. Comparison of the obtained data with the results of the previous study period up to 2012, and statistical analysis of the relationship of phytoplankton number and biomass with some hydrophysical and hydrochemical parameters were carried out. According to the average phytoplankton biomass (16.6±1.7 g/m³), the lake ecosystem was in the late of eutrophication stage, i.e. at the end of the eutrophy or the beginning of hypertrophy. The lowest biomass (0.7 g/m³ in June and 2.3 g/m³ in August) was observed in the zone of macrophyte thickets. The maximum biomass (22 g/m³ in June and 32 g/m³ in August) was observed near the Rostov city. These biomass values in 2017 are close to those obtained during high-water phase in 2012. Against the background of a decrease in the maximum values of the total phytoplankton biomass in 2017, dominant complex was still formed by shade-tolerant filamentous nonheterocystous cyanobacteria of the “S”-type group. In June, the main dominant complex consisted of cyanobacteria *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *Pseudanabaena limnetica* (Lemm.) Komárek, and *Aphanizomenon gracile* (Lemm.) Lemm. In August, they were joined by *Limnothrix planctonica* (Wołosz.) Meffert, *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb, *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronb. et Komárek, *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. and *M. wesenbergii* (Kom.) Kom.. Compared with previous studies, a decrease in the abundance of the cyanobacteria *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anag. et Komárek and diatoms *Aulacoseira ambigua* (Grun.) Sim. and *A. granulata* (Ehr.) Sim. was established. In Levskii Bay, where the lowest number and biomass of phytoplankton were observed, mixotrophic phytoflagellates (cryptophytes) dominated. A multifactorial limitation of the phytoplankton development in summer, including nitrogen, sulfates and chlorides, was established.

Keywords: Lake Nero, phytoplankton, dominant species, abundance, biomass, abiotic factors, eutrophication