

СОДЕРЖАНИЕ ПИГМЕНТОВ В ФИТОПЛАНКТОНЕ, ЭПИФИТОНЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА НЕРО

Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева, Н. Ю. Метелева

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 10.07.2020

В работе представлены новые данные по содержанию пигментов в фитопланктоне, эпифитоне и донных отложениях мелководного высокопродуктивного оз. Неро (Ярославская область, Россия) по данным съемки летом 2017 г. Глубины на станциях изменялись в пределах 0.4–4 м, прозрачность воды – 20–150 см. Донные отложения озера были представлены сапропелем или сапропелем с остатками макрофитов. Содержание пигментов определяли спектрофотометрическим методом в 90% ацетоновом экстракте. Среднее содержание хлорофилла *a* в фитопланктоне составило 73.5 ± 6.1 мкг/л, в эпифитоне 40.7 ± 21.4 мг/м² субстрата, сумма хлорофилла *a* с феопигментами в донных отложениях – 313.1 ± 20.6 мкг/г сухого осадка, что характерно для оз. Неро. Относительное содержание феопигментов характеризуется невысокими величинами в функционирующих сообществах водорослей фитопланктона ($23 \pm 2\%$) и эпифитона ($28 \pm 2\%$) и достигают наибольших значений в донных отложениях ($89 \pm 1\%$). Между всеми растительными сообществами существуют конкурентные отношения, о чем свидетельствует различная вариабельность их продукционных характеристик. Коэффициент вариации концентрации хлорофилла *a* эпифитона достигает 190%, фитопланктона – 54%, хлорофилла *a* и феопигментов в донных отложениях – 29%. Пространственное распределение пигментов в водорослях зависит от наличия зарослей макрофитов. Заращение акватории высшей водной растительностью отрицательно влияет на содержание пигментов в фитопланктоне и положительно на их накопление в донных отложениях. Средняя концентрация хлорофилла *a* фитопланктона на станциях с зарослями макрофитов (49 ± 10 мкг/л) была в 1.5 раза меньше, чем на станциях без макрофитов (82 ± 7 мкг/л). В сапропеле суммарная концентрация хлорофилла *a* и его дериватов на открытых участках составила 277 ± 16 , на зарастающих – 397 ± 42 мкг/г сухого грунта. Трофический тип озера сохраняется гипертрофным на протяжении последних 800 лет, несмотря на многолетнюю динамику растительных сообществ. Экосистема озера находится на последней стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, феопигменты, фитопланктон, эпифитон, донные отложения.

DOI: 10.47021/0320-3557-2020-49-60

ВВЕДЕНИЕ

Концентрация хлорофилла *a* (Хл) – основного фотосинтезирующего пигмента количественно связана с продуктивностью растительных сообществ и поэтому используется при изучении трофического состояния водной экосистемы [Винберг, 1960 (Vinberg, 1960); Трифонова, 1993 (Trifonova, 1993); Китаев, 2007 (Kitaev, 2007); Müller, 1995; Yacobi, Zohary, 2010]. Наименее изученными остаются вопросы, связанные с выявлением роли отдельных растительных сообществ в формировании продуктивности первичного звена [Бульон, 2005 (Boulion, 2005); Трифонова и др., 1998 (Trifonova et al., 1998); Boulion, 2004]. Сильная вариабельность показателей трофии отмечается из-за динамики абиотических факторов, поэтому актуальны исследования в разных экологи-

ческих условиях. Наиболее значимы результаты, полученные в период максимальной продуктивности растительных сообществ. Интегральным показателем продукционных и деструкционных процессов служит содержание растительных пигментов в донных отложениях [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012)]. Оценка трофического статуса приобретает особое значение для экосистем, находящихся на последнем этапе олиготрофно-эвтрофной сукцессии.

Цель работы – изучить содержание и распределение Хл в фитопланктоне, эпифитоне и донных отложениях мелководного высокопродуктивного оз. Неро летом 2017 г. – в период наибольшей продуктивности растительных сообществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы для определения Хл в фитопланктоне были собраны из верхнего слоя эвфотической зоны озера 28 июня и 1 августа 2017 г. В эти же сроки отбирали пробы донных отложений (слой 0–10 см) на 21 станции, среди которых ст. 1 расположена на р. Сапе, впа-

дающей в озеро, остальные 20 – непосредственно в озере.

Пробы эпифитона собирали 30–31 июля 2017 г. на 9 станциях (2, 5а, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 16) с тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.), камыша озерного (*Scir-*

pus lacustris L.) и кубышки желтой (*Nuphar lutea* (L.) Smit). Эпифитон собирали с погруженных в воду частей макрофитов длиной 0.5 м. Процедура получения пробы обрастаний и экстракта из них пигментов описаны ранее [Метелева, 2001 (Metel'eva, 2001)].

Растительные пигменты определяли стандартным спектрофотометрическим методом в общем экстракте 90% ацетоном (из фитопланктона и эпифитона). Для достижения такой же концентрации ацетона в экстрактах из донных отложений на первом этапе извлечения использовали 100%, а затем – 90% ацетон. Оптические плотности экстрактов измеряли на спектрофотометре Лямбда-25 (производство США). Концентрацию Хл без учета продуктов разрушения (общий Хл) рассчитывали по уравнению [Jeffrey, Humphrey, 1975], дифференцированную оценку Хл и феопигментов (Ф) выполняли по уравнениям [Lorenzen, 1967]. Соотношение желтых и зеленых пигментов оценивали по индексам, отражающим соотношение

оптических плотностей экстракта в областях наибольшего поглощения общих каротиноидов и Хл без учета (E_{480}/E_{665} или E_{480}/E_{664}) и с учетом ($E_{480}/1.7E_{665}$) продуктов деградации Хл. Влажность донных отложений определяли по потере воды при высушивании проб при 60°C. Воздушно-сухую объемную массу донных отложений рассчитывали как в работе [Сигарева, Тимофеева, 2004 (Sigareva, Timofeeva, 2004)].

Озеро Неро расположено в зоне умеренно-континентального климата. Это мелководный водоем с площадью зеркала 57.8 км² и объемом водной массы $90 \cdot 10^6$ м³ [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)]. Средняя глубина озера 1.6 м, максимальная – 4.7 м. Среди основных факторов развития растительных сообществ – мелководность, интенсивная гидродинамика, повышенная минерализация воды, высокая внутренняя биогенная нагрузка, превышающая внешнюю [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия летом 2017 г. были близки к типичным для региона исследования. Температура воды в озере в период наблюдений на станциях составляла 22–25.5°C, средняя – $23.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$. На речной ст. 1 температура была немного ниже (20.2°C), чем в озере. В целом 2017 г. отличался более резкими изменениями

метеорологических условий, что стало характерным для периода глобального потепления климата. Характеристика станций приведена в книге [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)]. Схема расположения станций представлена на рис. 1.

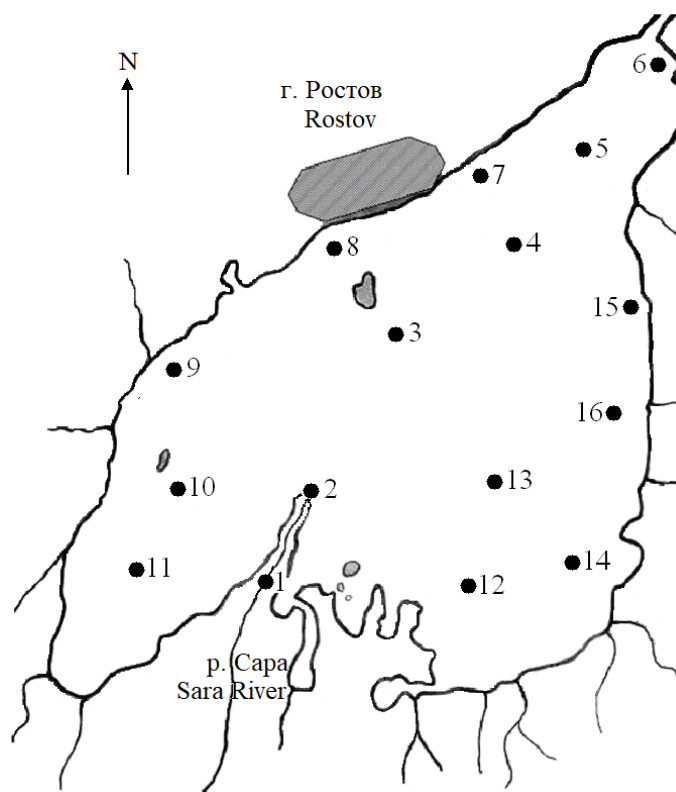


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб в оз. Неро.

Fig. 1. Outlay of sampling stations in Lake Nero.

Глубины на станциях изменялись в пределах 0.4–4 м, прозрачность воды – 20–150 см. Часть исследованных участков (6а, 9а, 10а, 12, 12а, 12б) характеризовалась наличием макрофитов. Глубины на зарастающих станциях составляли 0.4–1.3 м, прозрачность 30–50 см. Типы донных отложений представлены в ос-

новном сапропелем и сапропелем с остатками макрофитов. Только на речной ст. 1 сапропель содержал включения из мелкого песка. Значения влажности и воздушно-сухой объемной массы отложений соответствовали сапропелям (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики воды и верхнего (0–10 см) слоя донных отложений на станциях оз. Неро летом 2017 г.

Table 1. Characteristics of water and the upper (0–10 cm) layer of bottom sediments at stations of Lake Nero in summer 2017

Станция Station	Глубина, м Depth, m	Z ₁ , м Z ₁ , m	Z ₂ , м Z ₂ , m	Влаж- ность грунта, % Water con- tent, %	Воздушно-сухая объемная масса грунта, г/см ³ Air-dry volume mass of sediment, g/cm ³	Тип грунта Type of sediment
1	2.6	1.1	0.95	56.4	0.60	сапропель с песком sapropel with sand
2	1.5	0.6	0.45	86.9	0.14	сапропель / sapropel
3	2.0	0.3	–	91.6	0.09	сапропель / sapropel
4	4.0	0.3	0.4	91.0	0.10	сапропель / sapropel
5	1.65	0.3	0.35	90.3	0.10	сапропель / sapropel
6	1.4	0.2	0.35	90.9	0.10	сапропель / sapropel
6а*	0.4	0.3	0.4	92.1	0.08	сапропель / sapropel
7	1.5	0.3	0.35	90.8	0.10	сапропель / sapropel
8	1.6	0.3	0.35	88.0	0.13	сапропель / sapropel
9	1.3	0.3	0.35	86.4	0.15	сапропель / sapropel
9а*	0.5	0.5	0.35	88.0	0.13	сапропель с остатками растений sapropel with plant residues
10	1.5	0.5	0.55	88.7	0.12	сапропель / sapropel
10а*	1.0	0.5	1.0	93.5	0.07	сапропель / sapropel
11	1.7	1.5	1.8	91.3	0.09	сапропель / sapropel
12*	1.3	0.5	0.75	92.3	0.08	сапропель с остатками растений sapropel with plant residues
12а*	1.2	0.4	0.75	91.1	0.09	сапропель с остатками растений sapropel with plant residues
12б*	1.2	0.45	0.8	93.2	0.07	сапропель с остатками растений sapropel with plant residues
13	1.8	0.6	0.45	89.2	0.12	сапропель / sapropel
14	1.5	0.3	0.55	89.8	0.11	сапропель с остатками растений sapropel with plant residues
15	2.0	0.3	0.5	90.6	0.10	сапропель / sapropel
16	1.7	0.35	0.4	89.0	0.12	сапропель / sapropel

Примечание. *Станции с зарослями макрофитов. Z₁ и Z₂ – прозрачность воды в июне и августе соответственно.

Note. *Stations with thickets of macrophytes. Z₁ and Z₂ are water transparencies in June and August respectively.

Пигменты в фитопланктоне. Первые данные о содержании Хл фитопланктона в оз. Неро были получены в безледные периоды 1987–1989 гг. С 2000 по 2004 гг. наблюдения продолжались эпизодически, включая подледный период [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008); Сиделев и др., 2008 (Sidelev et al., 2008)]. Результаты настоящей работы, выполненной летом 2017 г., дополнили представления о продукционных характеристиках планктонных водорослей. Было показано, что концентрация общего Хл на станциях варьирует от 9 до 129 мкг/л (рис. 2). Повышенными

величинами отличаются участки, расположенные в открытой, наиболее глубокой, акватории озера (станции 3, 4, 5), а также фактически все прибрежные станции напротив населенных пунктов. Наиболее высокие концентрации Хл отмечены у г. Ростова (станции 7 и 8), а также у истока р. Вексы (ст. 6). Различия станций по концентрации Хл сохраняются во времени.

Концентрации Хл (без учета его производных) в июне (пределы 9–119, среднее 63±8 мкг/л) были меньше, чем в августе (пределы 12–129, среднее 84±9 мкг/л). Такое же соотношение концентраций выявлено по отдельным

показателям содержания пигментов – Хл и Ф (табл. 2). Вклад дериватов Хл изменялся в июне в пределах 9–43 (среднее $17.4 \pm 2.0\%$), в июле – 17–62% (среднее $29 \pm 3\%$).

Поглощение света каротиноидами почти такое же, как Хл, судя по индексам E_{480}/E_{664}

(табл. 2). Учитывая удельные коэффициенты экстинкции, можно отметить, что концентрации общих каротиноидов в фитопланктоне озера существенно меньше, чем Хл, что характерно для функционирующего сообщества водорослей.

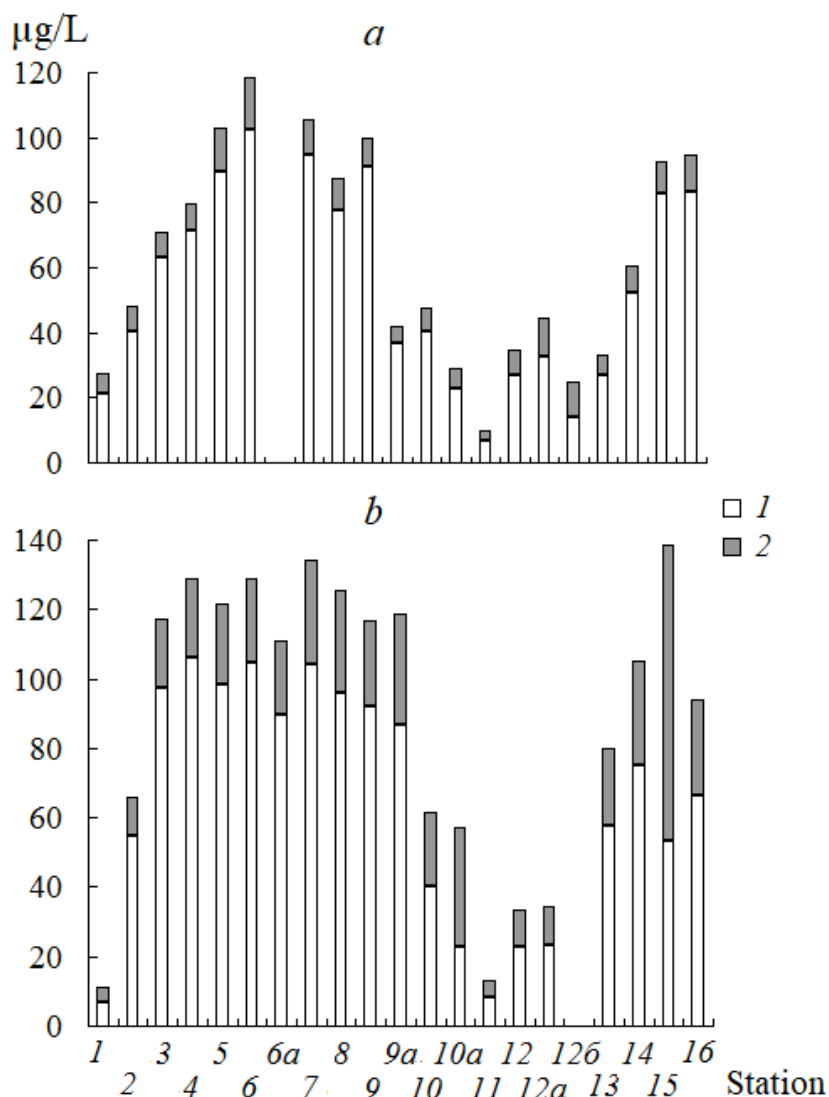


Рис. 2. Концентрации хлорофилла *a* (1) и феопигментов (2) в фитопланктоне оз. Неро в июне (а) и августе (b) 2017 г.

Fig. 2. Concentrations ($\mu\text{g/L}$) of chlorophyll *a* (1) and pheopigments (2) in phytoplankton of Lake Nero in June (a) and August (b) 2017.

Таблица 2. Показатели содержания растительных пигментов в фитопланктоне оз. Неро летом 2017 г.

Table 2. Indicators of plant pigment content in phytoplankton of Lake Nero in summer 2017

Станция Station	28.06.2017			1.08.2017		
	Хл*, мкг/л Chl*, $\mu\text{g/L}$	Ф, % / Ph, %	E_{480}/E_{664}	Хл*, мкг/л Chl*, $\mu\text{g/L}$	Ф, % / Ph, %	E_{480}/E_{664}
1	26.2	22.8	1.11	9.7	35.9	1.09
2	47.8	16.1	0.90	64.8	16.8	1.26
3	72.3	10.9	1.09	115.2	16.7	1.06
4	81.5	10.7	0.96	126.0	17.6	1.14
5	104.0	13.2	0.97	118.6	19.1	1.16
6	119.2	13.7	1.05	125.5	18.8	1.10

Станция Station	28.06.2017			1.08.2017		
	Хл*, мкг/л Chl*, µg/L	Ф, % / Ph, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₄	Хл*, мкг/л Chl*, µg/L	Ф, % / Ph, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₄
6а	—	—	—	107.8	19.5	1.12
7	107.8	10.0	1.04	128.6	22.6	1.26
8	89.0	11.1	1.04	119.3	23.7	1.08
9	102.5	8.9	1.03	112.7	21.1	1.15
9а	42.3	12.1	1.21	111.2	27.1	1.20
10	47.4	16.1	1.02	55.5	35.0	1.20
10а	28.3	21.7	1.02	45.0	59.9	1.21
11	8.9	32.0	1.40	11.7	36.8	1.19
12	33.3	23.2	1.08	30.5	31.9	1.29
12а	41.7	26.9	1.00	31.3	32.4	1.32
12б	21.6	43.1	1.35	—	—	—
13	32.6	18.4	1.19	74.3	27.8	1.15
14	60.7	14.0	1.14	97.9	28.4	1.20
15	94.7	10.6	0.95	109.3	61.5	1.24
16	96.0	12.3	0.87	87.1	29.1	1.17

Примечание. *Хлорофилл *a* общий, рассчитанный без учета его производных; “—” — нет данных.

Note. *Total chlorophyll *a* calculated without taking into account its derivatives; “—” — no data is available.

Одна из причин пространственных и временных различий продуктивности фитопланктона — развитие макрофитов, поскольку высшая водная растительность ухудшает основные условия функционирования планктонных водорослей: ослабляет интенсивность проникающей в воду солнечной радиации и уменьшает концентрацию элементов минерального питания. Данные наблюдений в 2017 г. показали, что средняя концентрация Хл на станциях с зарослями макрофитов (49 ± 10 мкг/л) была в 1.5 раза меньше, чем на станциях без макрофитов (82 ± 7 мкг/л) (табл. 3). Об угнетающем действии макрофитов на фитопланктон свидетельствуют также дан-

ные по содержанию Ф (табл. 3). Вклад продуктов разрушения Хл был наиболее существенным на станциях с макрофитами (среднее для июня и августа — 30%). На станциях без макрофитов этот показатель составил 20%, что характерно для открытых акваторий водоемов [Бульон, 1978 (Boulion, 1978)]. Данные о роли макрофитов в продуктивности оз. Неро согласуются с результатами моделирования на других озерах при разных значениях географической широты, общего фосфора, глубины и цветности, показавшими, что с увеличением продукции макрофитов уменьшается продукция фитопланктона [Бульон, 2005 (Boulion, 2005); Boulion, 2004].

Таблица 3. Среднее содержание растительных пигментов в фитопланктоне оз. Неро летом 2017 г. на станциях, сгруппированных по разным признакам

Table 3. Average content of plant pigments in phytoplankton of Lake Nero in summer 2017 at stations grouped according to various criteria

Вариант* Variant*	Число станций Number of stations	Хл, мкг/л Chl*, µg/L	Ф, % Ph, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₄
I	1	<u>26.2</u> 9.7	<u>22.8</u> 35.9	<u>1.11</u> 1.09
II	14	<u>76.0±8.6</u> 96.2±9.1	<u>14.1±1.6</u> 26.8±3.2	<u>1.05±0.03</u> 1.16±0.02
III	5	<u>33.4±4.0</u> 65.2±18.3	<u>25.4±5.0</u> 34.2±6.8	<u>1.13±0.06</u> 1.23±0.04
IV	19	<u>64.8±7.8</u> 88.0±8.6	<u>17.1±2.0</u> 28.7±3.0	<u>1.07±0.03</u> 1.18±0.02

Примечание. *I — р. Сара (ст. 1), II — станции без зарослей, III — с зарослями макрофитов, IV — все станции озера; над чертой — июнь, под чертой — август.

Note. *(I) Sara River (station 1), (II) stations without thickets, (III) with thickets of macrophytes, (IV) all stations of the lake; top numbers are for June, bottom numbers are for August.

В целом концентрации Хл в оз. Неро относятся к категории величин, характерных для высокопродуктивных водоемов. По данным

работы [Трифонов, 1993 (Trifonova, 1993)], концентрация Хл в планктоне гипертрофных озер составляет более 50 мкг/л. Среднее значе-

ние концентрации общего Хл (без учета Ф) для всех исследованных образцов воды в 2017 г. составляет 74 ± 6 мкг/л, Хл – 60 ± 5 мкг/л. Такие величины относятся к характерным концентрациям летнего периода и согласуются со средними концентрациями в прежние годы: 33–97 мкг/л [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)]. Следовательно, продуктивность фитопланктона в оз. Неро сохраняется на прежнем уровне и относится к гипертрофной категории.

Пигменты в эпифитоне. Продукционные характеристики эпифитона, как известно, существенно варьируют в зависимости от разных факторов – освещенности, температуры, содержания биогенных элементов, глубины, трофического статуса водоема, морфологических особенностей макрофитов и др. [Lalonde, Downing, 1991; Laugaste, Lessok, 2004; Belyaeva,

2017]. В оз. Неро концентрация Хл в эпифитоне летом 2017 г., рассчитанная на единицу поверхности субстрата, изменялась от 1.5 до 225.6 мг/м². Среднее значение на отдельных видах макрофитов различалось в 10 раз и составило 8.3 для камыша, 10.5 для кубышки, 10.9 для рогоза и 89.4 мг/м² для тростника. Средняя концентрация для всех проб составила 40.7 ± 21.4 мг/м², для четырех исследованных видов макрофитов – 29.8 ± 19.9 мг/м². Относительное содержание Ф достигало 38.9%, среднее – $28.4 \pm 1.6\%$ суммы с Хл, что близко к таковому в фитопланктоне (табл. 4). Показатель отношения концентраций желтых и зеленых пигментов эпифитона характеризовался значениями, тоже сопоставимыми с таковыми фитопланктона (табл. 2 и 3).

Таблица 4. Показатели содержания пигментов в эпифитоне оз. Неро летом 2017 г.

Table 4. Indicators of pigment content in epiphyton of Lake Nero in summer 2017

Станция Station	Субстрат Substrate	Хл*, мг/м ² Chl*, mg/m ²	Хл, мг/м ² Chl, mg/m ²	Ф, мг/м ² Ph, mg/m ²	Ф, % Ph, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₄
2	Кубышка/ Yellow water-lily	18.6	15.0	4.5	23.1	0.8
5a	Тростник/ Reed	5.1	3.7	2.0	34.8	1.1
6	Камыш/ Bulrush	14.3	9.9	6.2	38.9	0.8
6	Рогоз/ Cattail	1.5	1.1	0.6	35.9	1.0
9	Тростник/ Reed	225.6	182.8	52.3	22.9	0.8
9	Кубышка/ Yellow water-lily	2.4	1.7	0.9	34.6	1.1
11	Рогоз/ Cattail	18.4	14.6	5.0	25.7	0.7
12	Тростник/ Reed	201.9	163.9	45.9	21.8	0.8
14	Рогоз/ Cattail	9.3	7.2	2.7	27.8	0.9
15	Рогоз/ Cattail	14.6	11.8	3.5	22.8	0.9
15	Камыш/ Bulrush	2.4	1.9	0.7	27.5	0.8
15	Тростник/ Reed	5.7	4.4	1.6	27.3	0.9
16	Тростник/ Reed	8.9	7.0	2.5	26.3	1.0
2–16	Среднее/ Mean	40.7 ± 21.4	32.7 ± 17.4	9.9 ± 4.9	28.4 ± 1.6	0.9 ± 0.03

Примечание. *Хлорофилл *a* общий, рассчитанный без учета его производных.

Note. *Total chlorophyll *a* calculated without taking into account its derivatives.

Содержание Хл в эпифитоне летом 2017 г. и в прежние годы было сходным: 25.5 ± 6.1 в июле 1987 г. (среднее за сезон 60.1 ± 10.7 мг/м²) и 48.2 ± 9.6 в июле 2004 г. (за сезон 41.0 ± 8.4 мг/м²) [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)]. Концентрации Хл эпифитона близки к таковым в Ивановском и Угличском водохранилищах, а также в Волжском плесе Рыбинского водохранилища [Метелева, 2017 (Metel'eva, 2017); Mineeva, Metelyeva, 2019]. Наряду с этим известно, что концентрация Хл в эпифитоне некоторых водоемов может быть гораздо больше, чем в оз. Неро. Например, в зарастающем оз. Большое Раковое содержание Хл в эпифитоне достигало 451 мг/м² в июле 1988 г. и 621 мг/м² в июле 1989 г. [Экология..., 1999 (Ecologiya..., 1999)]. При этом концентрация Хл в фитопланктоне оз. Большое Раковое

была невелика (3.5 – 6.1 мкг/л) по сравнению с таковой в оз. Неро. Различную направленность в изменении соотношения между показателями продуктивности эпифитона и фитопланктона обычно рассматривают как итог конкуренции сообществ в разных экологических условиях [Трифорова и др., 2014, 2017 (Trifonova et al., 2014, 2017); Mineeva, Metelyeva, 2019]. На озерах Карельского перешейка было показано, что биомасса перифитона уменьшается по мере возрастания трофии: наибольшая ее величина была отмечена в слабозотрофных озерах, а наименьшая – в эвтрофных и гипертрофных [Трифорова и др., 2014 (Trifonova et al., 2014)].

Растительные пигменты в донных отложениях – интегральные показатели экологического состояния водной экосистемы.

Исследованиями на водоемах Верхней Волги продемонстрирована связь продукционных характеристик донных отложений с трофическим статусом экосистемы и установлено, что с увеличением продуктивности первичного звена трофической цепи возрастает доля площади, занимаемой грунтами с повышенным содержанием растительных пигментов [Сigareва, 2012 (Sigareva, 2012)]. Среди изученных водоемов бассейна Верхней и Средней Волги оз. Неро выделялось максимальным содержанием растительных пигментов в донных отложениях, рассчитанным с учетом площадей грунтов разного типа. Первые данные о растительных пигментах в донных отложениях оз. Неро были полу-

чены в 2000 г. [Сigareва и др., 2004 (Sigareva et al., 2004)]. Эпизодические наблюдения выполнялись также в 2002–2004 гг. [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)].

В 2017 г. исследования фонда растительных пигментов в донных отложениях оз. Неро были продолжены с целью оценки современного состояния экосистемы. Результаты показали, что содержание Хл в сумме с продуктами его разрушения (Хл+Ф) в слое отложений 0–10 см изменяется по станциям более чем в 10 раз – от 42 до 529 мкг/г сухого грунта. Основная часть пигментов (78–99%) состоит из продуктов разрушения Хл (рис. 3).

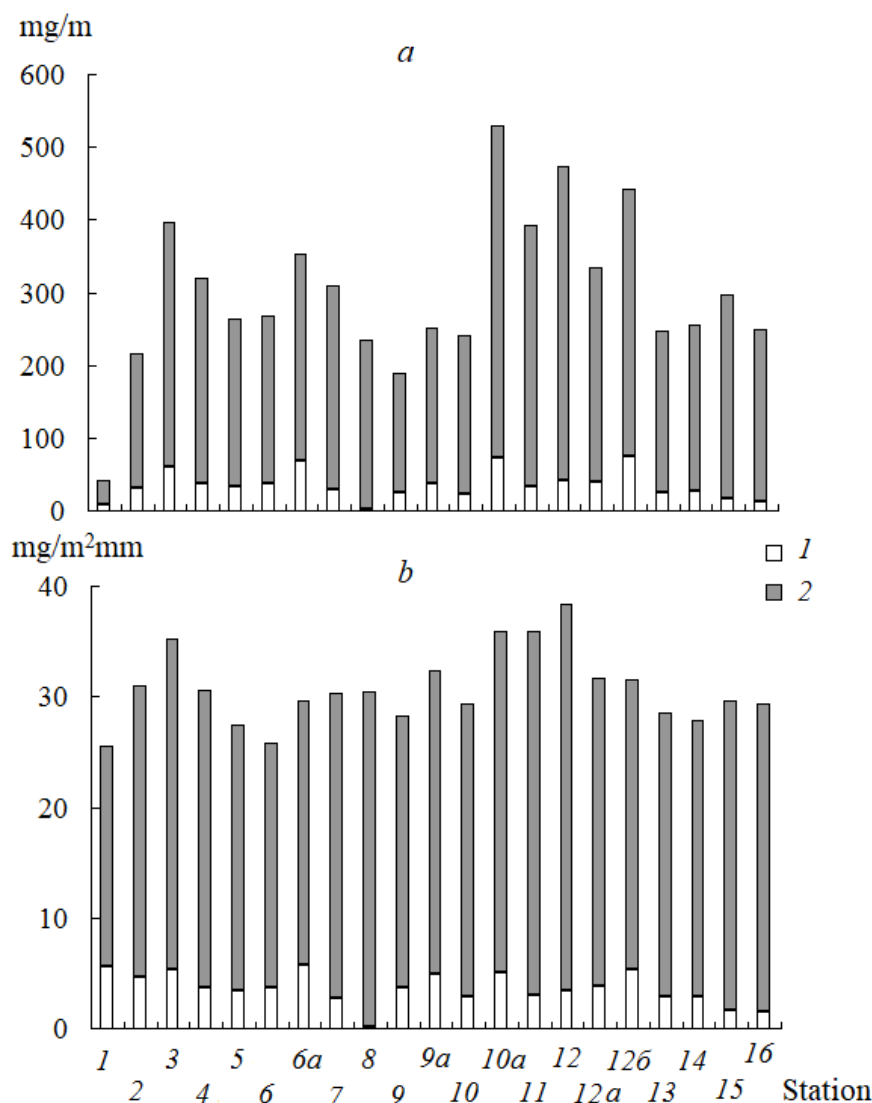


Рис. 3. Концентрации хлорофилла *a* (1) и феопигментов (2) в донных отложениях оз. Неро в 2017 г. *a* – мкг/г сухого осадка, *b* – мг/м²мм сырого грунта.

Fig. 3. Concentrations of chlorophyll *a* (1) and pheopigments (2) in bottom sediments of Lake Nero in 2017. *a* – µg/g dry sediment, *b* – mg/m²mm wet sediment.

Минимальная концентрация Хл+Ф, характерная для мезотрофных условий, отмечена в р. Саре (ст. 1). Другие участки относятся к гипертрофным, поскольку концентрация

Хл+Ф в донных отложениях превышает 120 мкг/г сухого грунта – максимальное значение для эвтрофной категории по [Möller, Scharf, 1986]. Наиболее высоким содержанием

растительных пигментов (от 250 до 529 мкг/г сухого грунта) выделяются зарастающие макрофитами участки (табл. 5).

Содержание осадочных пигментов в сапропеле на участках без макрофитов изменяется в пределах 190–397 мкг/г сухого грунта. Среднее для всех исследованных станций озера значение Хл+Ф (без речной ст. 1) составляет 313 ± 20 мкг/г сухого грунта. Средняя для станций без макрофитов концентрация Хл+Ф в сапропеле – 277 ± 16 , для зарастающих участков в 1.5 раза больше – 397 ± 42 мкг/г сухого грунта (табл. 6).

Установленные различия достоверны по критерию Стьюдента для 5% уровня значимости. Показатели деградации пигментного фонда (процентный вклад Ф в их сумму с Хл, соотношение каротиноидов с Хл – индексы E_{480}/E_{665} и $E_{480}/1.7E_{665к}$) свидетельствуют о том, что растительные пигменты в донных отложениях находятся в сильно деградированном виде, но полного их разрушения не отмечено (табл. 5 и 6). Аналогичная концентрация Хл+Ф в донных отложениях озера была получена ранее по данным съемок в 2000, 2002–2004 гг., когда наиболее часто отмечаемые значения относились к диапазону 200–400 мкг/г сухого грунта. Среднее содержание Хл+Ф в донных отложениях верхнего слоя в 2000 г. было

333.2 ± 58.9 , в 2003 – 311 ± 43 , в 2004 – 272 ± 31 мкг/г сухого грунта. В 2017 г. (313 мкг/г сухого грунта) оно фактически не изменилось. Сходство средних концентраций для верхнего слоя в первые годы наблюдений (2000–2004 гг.) с таковыми в 2017 г. свидетельствует о сохранении уровня продуктивности первичного звена в озере за годы, прошедшие между съемками донных отложений.

Степень деградации пигментного фонда, судя по содержанию Ф и относительному содержанию каротиноидов (индексы – E_{480}/E_{665} и $E_{480}/1.7E_{665к}$), по данным съемки в 2017 г. (табл. 5 и 6), тоже сопоставима с таковой в прежние годы. Многолетний ряд данных для концентрации Хл+Ф в расчете на толщину слоя отложений 1 мм в верхнем слое представлен следующими величинами: в сентябре 2000 – 58.2 ± 5.7 , в октябре 2002 – 51.8 ± 7.8 , в июле 2003 – 28.4 ± 2.1 , в июле 2004 – 29.4 ± 3.8 , в мае-сентябре 2004 – 31.1 ± 2.4 , в июне 2017 – 31.0 ± 0.7 , в августе 2017 – 32.7 ± 3.6 мг/м². Полученный ряд данных характеризуется в целом сходными значениями Хл+Ф без строгой направленности. Только в первые годы наблюдений концентрация Хл+Ф была выше, чем в остальные годы.

Таблица 5. Показатели содержания растительных пигментов в верхнем слое донных отложений на станциях оз. Неро в июне 2017 г.

Table 5. Indicators of plant pigment content in the upper layer of bottom sediments at stations of Lake Nero in June 2017

Станция Station	Хл+Ф, мг/м ² мм Chl+Ph, mg/m ² mm	Хл, мг/м ² мм Chl, mg/m ² mm	Ф, % Ph, %	E_{480}/E_{664}	$E_{480}/1.7E_{665к}$ $E_{480}/1.7E_{665а}$
1	25.5	5.6	78.1	2.40	1.63
2	31.0	4.6	85.2	3.74	2.43
3	35.2	5.4	84.8	4.05	2.63
4	30.6	3.6	88.1	4.28	2.73
5	27.4	3.5	87.4	4.29	2.74
6	25.8	3.7	85.7	4.17	2.70
6а	29.6	5.8	80.5	3.34	2.23
7	30.3	2.8	90.8	4.41	2.76
8	30.5	0.2	99.5	4.14	2.45
9	28.3	3.7	86.8	3.80	2.44
9а	32.4	4.9	84.8	3.60	2.34
10	29.3	2.8	90.3	3.71	2.33
10а	35.9	5.0	86.1	3.36	2.17
11	35.9	3.1	91.5	3.45	2.15
12	38.4	3.4	91.2	3.20	2.00
12а	31.7	3.8	88.1	3.90	2.49
12б	31.6	5.3	83.3	2.97	1.95
13	28.6	2.9	90.0	3.75	2.36
14	27.9	2.9	89.7	3.55	2.24
15	29.6	1.7	94.4	3.73	2.28
16	29.4	1.5	95.0	4.01	2.44

Таблица 6. Среднее содержание растительных пигментов в верхнем (0–10 см) слое донных отложений оз. Неро в июне 2017 г. на станциях, сгруппированных по разным признакам**Table 6.** Mean content of plant pigments in the upper (0–10 cm) layer of bottom sediments of Lake Nero in June 2017 at stations grouped according to various criteria

Вариант* Variant*	Хл+Ф/ Chl+Ph		Хл, мкг/г сухого грунта Chl, µg/g dry sediment	Ф, % Ph, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₅	E ₄₈₀ /1.7E _{665к} E ₄₈₀ /1.7E _{665а}
	мкг/г сухого грунта µg/g dry sediment	мг/м ² мм mg/m ² mm				
I	42.4	25.5	9.3	78.1	2.40	1.63
II	277±16.2	30.0±0.7	28.1±3.7	89.9±1.1	3.9±0.1	2.5±0.1
III	397±41.8	33.3±1.3	56.1±7.3	85.6±1.5	3.4±0.1	2.2±0.1
IV	313±20.6	31.0±0.7	36.5±4.4	88.7±1.0	3.8±0.1	2.4±0.1

Примечание. *I – р. Сара (ст. 1), II – открытая часть озера без зарослей (станции 2–11, 13–16), III – с зарослями макрофитов (станции 6а, 9а, 10а, 12, 12а, 12б), IV – все станции озера.

Note. *(I) Sara River (station 1), (II) open part of the lake without thickets (stations 2–11, 13–16), (III) with thickets of macrophytes (stations 6a, 9a, 10a, 12, 12a, 12b), (IV) all stations of the lake.

Динамика Хл+Ф в донных отложениях связана с многолетней изменчивостью продуктивности первичного звена трофической цепи экосистемы озера. Подтверждением служат итоги изучения фитопланктона. Как отмечалось выше, основной показатель продуктивности планктонных водорослей – среднегодовая концентрация Хл с 1987 по 2004 гг. варьировала в пределах 33–97 мкг/л, что свидетельствует о значительной межгодовой динамике продуктивности гипертрофного озера [Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008); Сиделев и др., 2008 (Sidelev et al., 2008)]. Максимальная продуктивность фитопланктона отмечена в 2000 г., что может быть связано с подъемом интенсивности суммарной солнечной радиации [Структура..., 2018 (Structura..., 2018)]. В этом же году отмечена наибольшая средняя концентрация Хл в фитопланктоне озера. Содержание Хл для фитопланктона в столбе воды составляет 110.9 мг/м² в 1987, 88.2 мг/м² в 2004 и 117.6 мг/м² в 2017 гг. Поскольку трехкратная прозрачность на большинстве участков озера превышает глубину, можно считать, что фитопланктон в основном находится в зоне фотосинтеза. Концентрация Хл в эпифитоне 25.5, 48.2 и 40.7 мг/м² субстрата в 1987, 2004 и

2017 гг. соответственно. Содержание Хл+Ф (26–38 мг/м²мм) и Хл (0.2–5.8 мг/м²мм) в верхнем слое сапропеля (табл. 5) заметно меньше, чем в эпифитоне, что дает основание предположить незначительную роль микрофитобентоса в формировании первичной продукции оз. Неро. Между всеми растительными сообществами существуют конкурентные отношения, о чем свидетельствует различная вариабельность продукционных характеристик: самой высокой изменчивостью характеризуется концентрация Хл эпифитона (190%), затем – фитопланктона (54%) и донных отложений (29%). Наибольшая (среди водорослей) концентрация Хл в эвфотической зоне отмечена для фитопланктона, поэтому можно считать, что основной вклад в первичную продукцию озера составляет фитопланктон.

Итоги изучения вертикального распределения пигментов в колонках сапропеля [Sigareva et al., 2019] показали, что гипертрофный статус был характерен для озера продолжительное время. Если считать, что средняя скорость осадконакопления в озере 1 мм/г., то 40–80 см, характеризующие длину исследованных кернов, будут соответствовать приблизительно 400–800 годам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание растительных пигментов Хл+Ф в функционирующих сообществах оз. Неро – фитопланктоне и эпифитоне в летний период 2017 г. характеризуется высокими величинами при сравнительно небольшом вкладе продуктов деградации Хл. Содержание пигментов в донных отложениях озера тоже относится к высоким значениям, но при абсолютном преобладании Ф по сравнению с Хл. Во все исследуемые годы, включая 2017, по содержанию растительных пигментов фитопланктона и донных отложений оз. Неро ха-

рактеризуется значениями гипертрофной категории. По концентрации Хл+Ф озеро занимает лидирующее положение среди изученных водоемов Ярославской области. Трофическое состояние озера остается стабильным на протяжении последних 800 лет, несмотря на многолетнюю динамику растительных сообществ. Отмечаются признаки естественного эвтрофирования озера – возрастание концентрации Хл+Ф от нижних слоев кернов к верхним. Экосистема озера находится на последней стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии, после

которой последует заболачивание, а затем и исчезновение озера как водного объекта. Следовательно, любое антропогенное вмешательство, в том числе и выемка сапропеля, может непредсказуемо повлиять на состояние донных отложений и, соответственно, на про-

дуктивность и экологическое состояние экосистемы. Полученные данные дополняют результаты мониторинга структуры и функционирования гидробионтов в гипертрофном озере и могут использоваться для изучения продуктивности растительных сообществ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. В. Законнову за сбор проб донных отложений и Т. П. Зайкиной за помощь в определении пигментов фитопланктона.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А18-118012690096-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Дом печати, 2003. 192 с.
- Бульон В.В. Продукция фитопланктона и макрофитов: моделирование и прогноз // Актуальные проблемы рационального использования биологических ресурсов водохранилищ. Рыбинск: Дом печати, 2005. С. 32–44.
- Бульон В.В. Содержание феопигментов в планктоне // Гидробиол. ж. 1978. Т. 14. № 3. С. 62–70.
- Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Метелева Н.Ю. Пигментные характеристики летнего эпифитона водохранилищ Верхней Волги // Вода: химия и экология. 2017. № 3. С. 34–39.
- Метелева Н.Ю. Эпифитон озера Неро // Биология внутр. вод. 2001. № 4. С. 32–45.
- Сigareва Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.: Тов-во научных изданий КМК. 2012. 217 с.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А. Содержание растительных пигментов в литоральных отложениях Рыбинского водохранилища в различные по водности годы // Биология внутр. вод. 2004. № 1. С. 25–35.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А., Бабаназарова О.В., Зубишина А.А. Содержание растительных пигментов в сапропеле оз. Неро // Биология внутр. вод. 2004. № 2. С. 39–46.
- Сиделев С.И., Бабаназарова О.В., Рычкова Е.Н. Многолетние изменения концентраций хлорофилла *a* в мелководном высокоэвтрофном озере // Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия: Матер. Всерос. конф. с международ. уч. Вологда: Центр оперативной полиграфии “Коперник”, 2008. С. 102–105.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. 406 с.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. 456 с.
- Трифорова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла *a* в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб: Гидрометеиздат, 1993. С. 158–163.
- Трифорова И.С., Афанасьева А.Л., Беляков В.П., Бардинский Д.С., Родионова Н.В., Русанов А.Г., Станиславская Е.В. Влияние колебаний гидрологического режима на состояние биологических сообществ эвтрофирующегося озера // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2017. Т. 19. № 2(3). С. 561–568.
- Трифорова И.С., Афанасьева А.Л., Русанов А.Г., Станиславская Е.В. Растительные сообщества озер центральной части Карельского перешейка как индикаторы их экологического состояния // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(4). С. 1034–1038.
- Трифорова И.С., Денисова И.А., Станиславская Е.В., Афанасьева А.Л. Первичная продукция и трофический статус макрофитного озера Большое Раковое (Карельский перешеек) // Биология внутр. вод. 1998. № 3. С. 9–18.
- Экология зарастающего озера и проблема его восстановления. СПб.: Наука, 1999. 222 с.
- Belyaeva P.G. Photosynthetic pigments of phytoplankton in the Sylva River (Middle Ural) // Inland Water Biology. 2017. Vol. 10. № 1. P. 52–58. DOI: 10.1134/S1995082917010035
- Boulion V.V. Contribution of major groups of autotrophic organisms to primary production of water bodies // Water Resour. 2004. V. 31. № 1. P. 92–102. DOI: 10.1023/B:WARE.0000013579.89883.55
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b* and *c* in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanz. 1975. Vol. 167. № 2. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Lalonde S., Downing J.A. Epiphyton biomass is related to lake trophic status, depth, and macrophyte architecture // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1991. V. 48. № 11. P. 2285–2291. DOI: 10.1139/f91-268
- Laugaste R., Lessok K. Planktonic algae and epiphyton of the littoral in lake Peipsi, Estonia // Limnologia. 2004. Vol. 34. № 1–2. P. 90–97. DOI: 10.1016/S0075-9511(04)80026-4
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnol. Oceanogr. 1967. Vol. 12. № 2. P. 343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343

- Mineeva N.M., Metelyeva N.Yu. Comparative characteristics of phytoplankton and epiphyton productivity in the Upper Volga Reservoirs // *Inland Water Biology*. 2019. V. 12. Suppl. 1. P. 37–44. DOI: 10.1134/S1995082919050146
- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia*. 1986. Vol. 143. № 1. P. 327–329. DOI: 10.1007/BF00026678
- Müller U. Vertical zonation and production rates of epiphytic algae on *Phragmites australis* // *Freshwater Biol.* 1995. Vol. 34. № 1. P. 69–80. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1995.tb00424.x
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Zakonnov V.V., Rusanov A.G., Ignatyeva N.V., Pozdnyakov Sh.R. Features of natural eutrophication of shallow Lake Nero based on sedimentary pigments // *Inland Water Biology*. 2019. Vol. 12. Suppl. 2. P. 33–41. DOI: 10.1134/S1995082919060129
- Yacobi Y.Z., Zohary T. Carbon:chlorophyll *a* ratio, assimilation numbers and turnover times of Lake Kinneret phytoplankton // *Hydrobiologia*. 2010. Vol. 639. P. 185–196. DOI: 10.1007/s10750-009-0023-3

REFERENCES

- Belyaeva P.G. Photosynthetic pigments of phytoperiphyton in the Sylva River (Middle Ural). *Inland Water Biology*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 52–58. doi: 10.1134/S1995082917010035
- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyi S.A. *Gidrologiya i gidrokimiya ozera Nero* [Hydrology and Hydrochemistry of Lake Nero]. Rybinsk: Dom Pechati, 2003, 192 p. (In Russian)
- Boulion V.V. Soderzhanie feopigmentov v planktone [Content of pheopigments in plankton]. *Gidrobiol. Zh.*, 1978, Bd. 14, no. 3, pp. 62–70. (In Russian)
- Boulion V.V. Contribution of major groups of autotrophic organisms to primary production of water bodies. *Water Resour.*, 2004, vol. 31, no. 1, pp. 92–102. doi: 10.1023/B:WARE.0000013579.89883.55
- Boulion V.V. *Produksiya fitoplanktona i makrofitov: modelirovanie i prognoz* [Production of phytoplankton and macrophytes: modeling and forecast]. Aktual'nye problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya biologicheskikh resursov vodokhranilishch. Rybinsk: Dom pechati, 2005, pp. 32–44. (In Russian)
- Ekologiya zarastayushchego ozera i problema ego vosstanovleniya* [Ecology of the overgrowing lake and the problem of its restoration]. SPb.: Nauka, 1999, 222 s. (In Russian)
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b* and *c* in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanz.*, 1975, vol. 167, no. 2, pp. 191–194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Kitaev S.P. *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtologov* [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr Ross. Akad. Nauk, 2007, 395 p. (In Russian)
- Lalonde S., Downing J.A. Epiphyton biomass is related to lake trophic status, depth, and macrophyte architecture. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1991, vol. 48, no. 11, pp. 2285–2291. doi: 10.1139/f91-268
- Laugaste R., Lessok K. Planktonic algae and epiphyton of the littoral in lake Peipsi, Estonia. *Limnologica*, 2004, vol. 34, no. 1–2, pp. 90–97. doi: 10.1016/S0075-9511(04)80026-4
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 1967, vol. 12, no. 2, pp. 343–346. doi: 10.4319/lo.1967.12.2.0343
- Metelyeva N.Yu. Epifiton ozera Nero [Epiphyton of Lake Nero]. *Biologiya vnutr. vod*, 2001, no. 4, pp. 32–45. (In Russian)
- Metelyeva N.Yu. Pigmentnye kharakteristiki letnego epifitona vodokhranilishch Verkhney Volgi [Pigment characteristics of summer epiphyton in reservoirs of the Upper Volga]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 3, pp. 34–39. (In Russian)
- Mineeva N.M., Metelyeva N.Yu. Comparative characteristics of phytoplankton and epiphyton productivity in the Upper Volga Reservoirs. *Inland Water Biol.*, 2019, vol. 12, suppl. 1, pp. 37–44. doi: 10.1134/S1995082919050146
- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication. *Hydrobiologia*, 1986, vol. 143, no. 1, pp. 327–329. doi: 10.1007/BF00026678
- Müller U. Vertical zonation and production rates of epiphytic algae on *Phragmites australis*. *Freshwater Biol.*, 1995, vol. 34, no. 1, pp. 69–80. doi: 10.1111/j.1365-2427.1995.tb00424.x
- Sidelev S.I., Babanazarova O.V., Rychkova E.N. Mnogoletnie izmeneniya kontsentratsiy khlorofilla *a* v melkovodnom vysokoevtrofnom ozere [Long-term changes in concentrations of chlorophyll *a* in a shallow-water highly eutrophic lake]. *Vodnye ekosistemy: troficheskie urovni i problemy podderzhaniya bioraznoobraziya: Mater. Vseros. konf. S mezhdunarod. uch.* Vologda: Tsentr operativnoy poligrafii “Kopernik”, 2008, pp. 102–105. (In Russian)
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A. Soderzhanie rastitel'nykh pigmentov v litoral'nykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilishcha v razlichnye po vodnosti gody [Content of vegetative pigments in bottom sediments of the Rybinsk reservoir littoral in different water-level years]. *Biologiya vnutr. vod*, 2004, no. 1, pp. 25–35. (In Russian)
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Babanazarova O.V., Zubishina A.A. Soderzhanie rastitel'nykh pigmentov v sapropele oz. Nero [The Content of vegetative pigments in sapropel of Lake Nero]. *Biologiya vnutr. Vod*, 2004, no. 2, pp. 39–46. (In Russian)
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Zakonnov V.V., Rusanov A.G., Ignatyeva N.V., Pozdnyakov Sh.R. Features of natural eutrophication of shallow Lake Nero based on sedimentary pigments. *Inland Water Biol.*, 2019, vol. 12, suppl. 2, pp. 33–41. doi: 10.1134/S1995082919060129

- Sigareva L.E. *Khlorofill v donnykh otlozheniyakh volzhskikh vodoemov* [Chlorophyll in bottom sediments of Volga Reservoirs]. M.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, 217 p. (In Russian)
- Sostoyanie ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka* [The State of the ecosystem of Lake Nero at the beginning of the XXI century]. M.: Nauka, 2008, 406 p. (In Russian)
- Struktura i funktsionirovanie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka* [Structure and functioning of the ecosystem of the Rybinsk reservoir at the beginning of the 21st century]. M.: RAN, 2018, 456 p. (In Russian)
- Trifonova I.S. Otsenka troficheskogo statusa vodoemov po sodержaniyu khlorofilla *a* v planktone [Estimation of the trophic status of water bodies on the base of content of chlorophyll *a* in plankton]. *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoy produktsii planktona vnutrennikh vodoemov*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993, pp. 158–163. (In Russian)
- Trifonova I.S., Afanasieva A.L., Belyakov V.P., Bardinskiy D.S., Rodionova N.V., Rusanov A.G., Stanislavskaya E.V. Vliyanie kolebaniy gidrologicheskogo rezhima na sostoyanie biologicheskikh soobshchestv evtrofiruyushchegosya ozera [Influence of hydrological regime changes on the state of biological communities of a lake in condition of eutrophication]. *Izv. Samar. nauch. tsentra RAN*, 2017, bd. 19, no. 2(3), pp. 561–568. (In Russian)
- Trifonova I.S., Afanasieva A.L., Rusanov A.G., Stanislavskaya E.V. Rastitel'nye soobshchestva ozer tsentral'noy chasti Karel'skogo peresheyka kak indikatory ikh ekologicheskogo sostoyaniya [Vegetable communities in the lakes of Karelian isthmus central part as indicators of their ecological state]. *Izv. Samar. nauch. tsentra RAN*, 2014, bd. 16, no. 1(4), pp. 1034–1038. (In Russian)
- Trifonova I.S., Denisova I.A., Stanislavskaya E.V., Afanasieva A.L. Pervichnaya produktsiya i troficheskiy status makrofitnogo ozera Bol'shoe Rakovoe (Karel'skiy peresheek) [Primary production and trophic status of the macrophytic Lake Bol'shoe Rakovoe (Karelian Isthmus)]. *Biologiya vnutr. Vod*, 1998, no. 3, pp. 9–18. (In Russian)
- Vinberg G.G. *Pervichnaya produktsiya vodoemov* [Primary production of water bodies]. Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1960, 329 p. (In Russian)
- Yacobi Y.Z., Zohary T. Carbon:chlorophyll *a* ratio, assimilation numbers and turnover times of Lake Kinneret phytoplankton. *Hydrobiologia*, 2010, vol. 639, pp. 185–196. doi: 10.1007/s10750-009-0023-3

PIGMENT CONTENT IN PHYTOPLANKTON, EPIPHYTON AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE NERO

L. E. Sigareva, N. A. Timofeeva, N. Yu. Meteleva

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

This article presents new data on pigment concentrations in phytoplankton, epiphyton and bottom sediments of the shallow highly productive Lake Nero (Yaroslavl Region, Russia) based on survey materials in summer 2017. The depths at the stations varied within 0.4–4 m, the values of water transparency were 20–150 cm. The bottom sediments of the lake were sapropel or sapropel with remains of macrophytes. The pigment concentrations were determined by spectrophotometric method in 90% acetone extract. The average concentrations of chlorophyll *a* were 73.5 ± 6.1 $\mu\text{g/L}$ in phytoplankton and 40.7 ± 21.4 mg/m^2 of substrate in epiphyton, the sum of chlorophyll *a* with pheopigments in bottom sediments was 313 ± 20.6 $\mu\text{g/g}$ dry sediment. These values are comparable to those in the previous observation years. The relative content of pheopigments (in the sum with chlorophyll *a*) was characterized by low values in the functioning communities of phytoplankton ($23 \pm 2\%$) and epiphyton ($28 \pm 2\%$) and reached the highest value in bottom sediments ($89 \pm 1\%$). There are competitive relations between all plant communities, as evidenced by the different variability of their production characteristics. The variation coefficient of the chlorophyll concentration reached 190% in epiphyton and only 54% in phytoplankton, while the coefficient of variation of the content of chlorophyll *a* with pheopigments in bottom sediments was 29%. The spatial distribution of algal pigments depended on the presence of macrophyte thickets. Overgrowing of the water area with macrophytes affected the content of pigments in phytoplankton negatively but the pigment accumulation in bottom sediments positively. The average chlorophyll concentration of phytoplankton at stations with macrophyte thickets (49 ± 10 $\mu\text{g/L}$) was 1.5 times less than at stations without macrophytes (82 ± 7 $\mu\text{g/L}$). In sapropel, the mean value of the sum of chlorophyll *a* and its derivatives in open sites was 277 ± 16 and in overgrown areas was 397 ± 42 $\mu\text{g/g}$ dry sediment. The trophic state of the lake has remained hypertrophic for the last 800 years, despite the long-term dynamics of plant communities. The ecosystem of the lake Nero is at the last stage of succession.

Keywords: chlorophyll *a*, pheopigments, phytoplankton, epiphyton, bottom sediments