

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,  
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 581.132.1+556.555

ПРИЗНАКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭВТРОФИРОВАНИЯ МЕЛКОВОДНОГО  
оз. НЕРО ПО ОСАДОЧНЫМ ПИГМЕНТАМ

© 2019 г. Л. Е. Сигарева<sup>а, \*</sup>, Н. А. Тимофеева<sup>а</sup>, В. В. Законнов<sup>а</sup>,  
А. Г. Русанов<sup>б</sup>, Н. В. Игнатьева<sup>б</sup>, Ш. Р. Поздняков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,  
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

<sup>б</sup>Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: sigareva@ibiw.yaroslavl.ru

Поступила в редакцию 25.07.2018 г.

После доработки 14.09.2018 г.

Принята к публикации 27.11.2018 г.

Проанализированы данные спектрофотометрического определения растительных пигментов в донных отложениях оз. Неро по материалам съемки 2017 г. Установлена низкая вариабельность ( $CV = 27-31\%$ ) содержания хлорофилла *a* и феопигментов по площади дна и по вертикали в ядрах сапропеля. Значения концентраций пигментов в донных отложениях озера относятся к гипертрофной категории. Высокопродуктивный статус озера по содержанию пигментов ( $>300$  мкг/г сухого грунта) сохраняется для периода формирования 80-сантиметрового слоя сапропеля (~800 лет). Выявлены тренды увеличения концентрации растительных пигментов от нижних слоев ядер к верхним при достоверной связи с вкладом органического вещества и общего азота, что свидетельствует о естественном эвтрофировании озера.

**Ключевые слова:** хлорофилл, феопигменты, сапропель, озеро Неро, эвтрофирование

**DOI:** 10.1134/S0320965219060147

ВВЕДЕНИЕ

Потенциальные запасы сапропеля в РФ оценивают в 250 млрд м<sup>3</sup> (Борисов и др., 2014). Интерес к изучению мелководных сапропелевых озер многогранен, поскольку их экосистемы находятся на конечном этапе олиготрофно-эвтрофной сукцессии и могут служить объектами для теоретической экологии, в том числе для решения вопросов о механизмах и типах эвтрофирования — естественного и антропогенного (Мальцев и др., 2014; Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Gebrehiwot et al., 2017; Sanchez et al., 2017; Søndergaard et al., 2003; Stankevica et al., 2014; Strakhovenko et al., 2014; Yermolaeva et al., 2016). Практическое значение таких озер обусловлено возможностями использования сапропеля в сельском хозяйстве из-за высокой концентрации азота, а также в медицине для получения природных антибиотиков — гидрокортизона, преднизолон и др. (Борисов и др., 2014; Платонов и др., 2014; Kurzo et al., 2017).

Озеро Неро (57°10' с.ш., 39°26' в.д.) — уникальный водоем, один из наиболее продуктивных

в Европе. Трофическое состояние озера по содержанию растительных пигментов в планктоне и донных отложениях — гипертрофное (Состояние..., 2008). Озеро подвергается комплексному воздействию природных и антропогенных факторов. В настоящее время интерес к оз. Неро возрос в связи с планированием его интенсивного использования в разных целях — от рекреации до добычи сапропеля. Однако имеющаяся база научных данных для решения практических задач недостаточна. Один из главных вопросов, от которого зависит характер водоохранных мероприятий, — эвтрофирование озера. Изучение эвтрофирования водоемов до сих пор представляет определенные трудности, поскольку имеются разногласия по этой проблеме как методические, так и методологические (Даценко, 2007; Bul'on, 1998; Datsenko, 1998; Eutrophication..., 1982). Есть мнение, что эвтрофирование должно рассматриваться только как антропогенное при полном отрицании естественного (Bul'on, 1998). Один из адекватных подходов к изучению эвтрофирования — анализ пространственно-временной динамики пигментных характеристик донных отложений (Guilizzoni et al., 1983; Сигарева, 2012; Sigareva et al., 2013; Sigareva, 2014).

Сокращения: D — оптическая плотность; ОВ — органическое вещество; Ф — феопигменты; Хл — хлорофилл *a*; CV — коэффициент вариации.

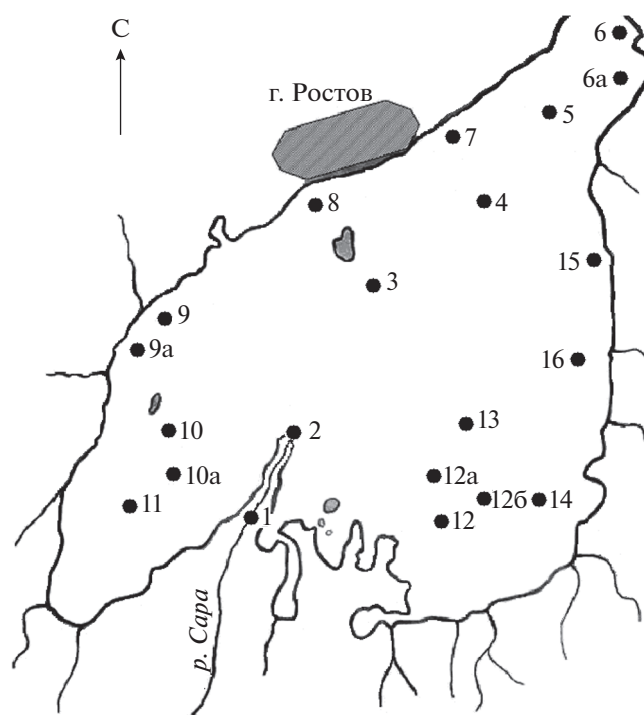


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб (●) в оз. Неро.

Цель работы — выявить признаки естественно-го эвтрофирования оз. Неро по многолетним трендам характеристик продуктивности экосистемы: содержанию в донных отложениях растительных пигментов, органического вещества и биогенных элементов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Станции наблюдений располагались по продольному разрезу озера от устья р. Сара до истока р. Векса, а также по периметру прибрежных участков, включающих места впадения ручьев и стоков г. Ростов, в зарослях макрофитов и на открытой акватории (рис. 1). Пробы донных отложений отбирали из верхнего 10-сантиметрового слоя дночерпателем Экмана–Берджа на ст. 1–16. Керны длиной 40 и 45 см (ст. 2, 10, 12) отбирали гравитационной трубкой из полихлорвинила, 70 и 80 см (ст. 4, 5, 7, 15) — 1-метровым батометром из органического стекла с помощью аквалангиста. Короткие керны делили на слои толщиной 5 см, длинные — 10 см. Образцы донных отложений хранили в холодильнике до анализа.

Гранулометрический состав отложений определяли с применением электромагнитной просеивающей установки “Analysette-3” фирмы Alfred Fritsch & CO (Германия) методом мокрого рассева. Отдельные размерные фракции сапропеля смывали с сит и высушивали на водяной бане.

Выделяли фракции с диаметрами частиц  $>1$ ,  $0.5–1.0$ ,  $0.2–0.5$ ,  $0.1–0.2$ ,  $0.05–0.1$ ,  $0.01–0.05$  и  $<0.01$  мм, на основе которых рассчитывали средний диаметр. Объемную массу грунта, естественную влажность, ОВ определяли традиционными методами (Аринушкина, 1970; Буторин и др., 1975), общий азот — в соответствии с ГОСТ 26107-84 (ГОСТ..., 1984), общий фосфор — по методу Метя в модификации Мартыновой и Шмидеберг (1983), содержание Хл и Ф — спектрофотометрическим методом в 90%-ном ацетоновом экстракте (Сигарева, 2012; Lorenzen, 1967). Соотношение каротиноидов и Хл оценивали, исходя из  $D$  экстрактов в максимумах поглощения этих пигментов (480 и 665 нм) без поправки ( $D_{480}/D_{665}$ ) и с поправкой ( $D_{480}/1.7D_{665к}$ ) на дериваты Хл.

Вычисляли средние значения показателей и их ошибки, коэффициенты вариации и корреляции; достоверность различий между рядами параметров определяли по критерию Стьюдента при  $p = 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основа изучения эвтрофирования озера — оценка современных продукционных показателей трофического статуса по материалам пространственного распределения по ложу водоема. Источниками растительных пигментов в донных отложениях оз. Неро служат в основном фитопланктон, макрофиты и эпифитон, а на участках с глубинами в пределах фотосинтезирующей зоны (менее трех прозрачностей) — микрофитобентос. Бентосные формы водорослей развиваются на сапропеле и остатках отмерших макрофитов. Только близ устья р. Сара (ст. 1) сапропель содержал включения из мелкого песка. Гранулометрический состав, высокая влажность и низкая воздушно-сухая объемная масса отложений соответствуют водно-физическим свойствам сапропеля (табл. 1). Уровень содержания органического вещества (11–40%), общего азота (0.5–1.4%) и общего фосфора (0.2–1.9 мг/г сухого грунта) характеризует сапропель как биологически активный. Содержание Хл в сумме с Ф (Хл + Ф) в поверхностном слое сапропеля изменяется по станциям от 42 до 529 мкг/г сухого грунта. Большая часть пигментов (78–99%) состоит из дериватов Хл (табл. 2). Минимальная концентрация Хл + Ф отмечена в р. Сара (ст. 1), недалеко от места впадения в озеро, максимальная — на зарастающей макрофитами ст. 10а. Среднее значение Хл + Ф для всех станций озера ( $313 \pm 20$  мкг/г сухого грунта,  $1.09 \pm 0.07$  мг/г ОВ) близко к уровню величин, полученных в предшествующий период (2000, 2002–2004 гг.) (Состояние..., 2008) и значительно выше, чем в других водоемах верхневолжского бассейна (Сигарева, 2012). Концентрация осадочных пигментов на речной ст. 1 относится к мезотрофной категории, все другие озерные

**Таблица 1.** Характеристика верхнего (0–10 см) слоя донных отложений на станциях оз. Неро в июне 2017 г.

Номер станции	Глубина, м	Прозрачность, м	Средний диаметр частиц, мм	Влажность, %	Воздушно-сухая объемная масса, г/см <sup>3</sup>	ОВ, %	N <sub>общ</sub> , %	P <sub>общ</sub> , мг/г сухого грунта
1	2.6	1.1	0.21	56.4	0.60	11.4	0.5	1.91
2	1.5	0.6	0.18	86.9	0.14	25.3	0.9	0.54
3	2.0	0.3	0.16	91.6	0.09	31.6	1.19	1.06
4	4.0	0.3	0.14	91.0	0.10	29.5	1.15	1.81
5	1.65	0.3	0.14	90.3	0.10	27.3	1.16	1.0
6	1.4	0.2	0.09	90.9	0.10	30.2	1.17	0.58
6а*	0.4	0.3	0.16	92.1	0.08	37.9	1.31	0.84
7	1.5	0.3	0.08	90.8	0.10	28.8	1.05	1.0
8	1.6	0.3	0.12	88.0	0.13	29.6	1.05	0.58
9	1.3	0.3	0.14	86.4	0.15	23.5	0.85	0.65
9а*	0.5	0.5	0.20	88.0	0.13	11.4	1.11	0.56
10	1.5	0.5	0.13	88.7	0.12	27.6	1.01	0.58
10а*	1.0	0.5	0.13	93.5	0.07	34.6	1.32	1.2
11	1.7	1.5	0.23	91.3	0.09	37.5	1.31	0.24
12*	1.3	0.5	0.19	92.3	0.08	38.7	1.36	0.3
12а*	1.2	0.4	0.23	91.1	0.09	32.5	1.13	0.62
12б*	1.2	0.45	0.21	93.2	0.07	39.5	1.3	0.92
13	1.8	0.6	0.14	89.2	0.12	25.4	0.95	0.7
14	1.5	0.3	0.14	89.8	0.11	28	0.96	0.64
15	2.0	0.3	0.10	90.6	0.10	27.5	1.1	0.7
16	1.7	0.35	0.13	89.0	0.12	25.0	0.97	0.35

Примечание. \* Станции с зарослями макрофитов: 6а – рдест плавающий (*Potamogeton natans* L.), рдест пронзеннолистный (*P. perfoliatus* L.), тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), 9а – кубышка желтая (*Nuphar lutea* (L.) Smith), 10а – рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.), тростник, 12, 12а – камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), 12б – тростник, рогоз узколистный. На ст. 1 – сапрпель с тонким песком, на остальных – сапрпель или сапрпель с остатками растений. Здесь и в табл. 4 N<sub>общ</sub>, P<sub>общ</sub> – концентрация общего азота и фосфора, соответственно.

участки – типично гипертрофные (Möller, Scharf, 1986). Такие данные согласуются с высокими среднегодовыми концентрациями Хл в планктоне (33–97 мкг/л) (Состояние..., 2008).

Зарастающие макрофитами участки выделяются более высоким содержанием растительных пигментов в сапрпеле (от 250 до 529 мкг/г сухого грунта), чем участки без макрофитов (от 190 до 397) (табл. 2). Средняя для открытых станций концентрация Хл + Ф в сапрпеле – 277 ± 16, для зарастающих участков в ~1.5 раза больше – 397 ± 42 мкг/г сухого грунта. Следовательно, высшая водная растительность обогащает сапрпель растительными пигментами и поэтому влияет на трофические показатели дна. Средняя концентрация

пигментов Хл + Ф на станциях с вероятным развитием микрофитобентоса (348 ± 35 мкг/г) была достоверно больше ( $p < 0.05$ ), чем на остальных станциях (278 ± 18 мкг/г).

Показатели деградации пигментного фонда (процентная доля Ф в Хл + Ф, соотношение каротиноидов и Хл, оцененное по индексам D<sub>480</sub>/D<sub>665</sub> и D<sub>480</sub>/1.7D<sub>665к</sub>, свидетельствуют о том, что растительные пигменты в донных отложениях находятся в сильно деградированном виде (табл. 2). Высокая степень деградации фотосинтетических пигментов – итог утилизации и трансформации первичной продукции органического вещества в экосистеме.

**Таблица 2.** Среднее содержание растительных пигментов в донных отложениях на станциях, сгруппированных по разным признакам, в оз. Неро (июнь 2017 г., слой 0–10 см)

Варианты*	ОВ, %	Хл + Ф			Доля Ф в (Хл + Ф), %	D <sub>480</sub> /D <sub>665</sub>	D <sub>480</sub> /1.7D <sub>665к</sub>
		мкг/г сухого грунта	мг/г ОВ	мг/(м <sup>2</sup> · мм)			
I	11.4	42.4	0.37	25.5	78.1	2.40	1.63
II	28.2 ± 0.9	277.1 ± 16.2	0.98 ± 0.04	30.0 ± 0.7	89.9 ± 1.1	3.9 ± 0.1	2.5 ± 0.1
III	32.4 ± 4.3	397.1 ± 41.8	1.34 ± 0.19	33.3 ± 1.3	85.6 ± 1.5	3.4 ± 0.1	2.2 ± 0.1
IV	31.0 ± 2.8	347.8 ± 34.6	1.18 ± 0.13	32.4 ± 1.0	87.1 ± 1.2	3.5 ± 0.1	2.2 ± 0.1
V	27.8 ± 0.8	278.3 ± 17.8	1.00 ± 0.05	29.5 ± 0.8	90.2 ± 1.5	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
VI	29.4 ± 1.4	313.1 ± 20.6	1.09 ± 0.07	31.0 ± 0.7	88.7 ± 1.0	3.8 ± 0.1	2.4 ± 0.1

Примечание. \* I – р. Сара (ст. 1), II – открытая часть без зарослей (ст. 2–11, 13–16), III – с зарослями макрофитов (ст. 6а, 9а, 10а, 12, 12а, 12б), IV – глубины менее трехкратной прозрачности (ст. 2, 6а, 9а, 10, 10а, 11, 12, 12а, 12б, 13), V – глубины более трехкратной прозрачности (ст. 3–9, 14–16), VI – все станции озера.

В 2017 г. среднее содержание Хл + Ф в верхнем слое донных отложений (0–10 см) было сопоставимым с таковым в предыдущие годы наблюдений при наиболее часто встречаемых значениях в пределах 200–400 мкг/г сухого грунта. Концентрации Хл + Ф в расчете на 1 м<sup>2</sup> и толщину слоя 1 мм грунта при естественной влажности в июне 2017 г. достигали 31.0 ± 0.72, в августе 2017 г. – 32.7 ± 3.6 мг/(м<sup>2</sup> · мм), что также входит в диапазон значений, полученных ранее (28.4–58.2 мг/(м<sup>2</sup> · мм))

**Таблица 3.** Оценка достоверности различий между концентрациями растительных пигментов (Хл + Ф) в слоях кернов по *t*-критерию Стьюдента

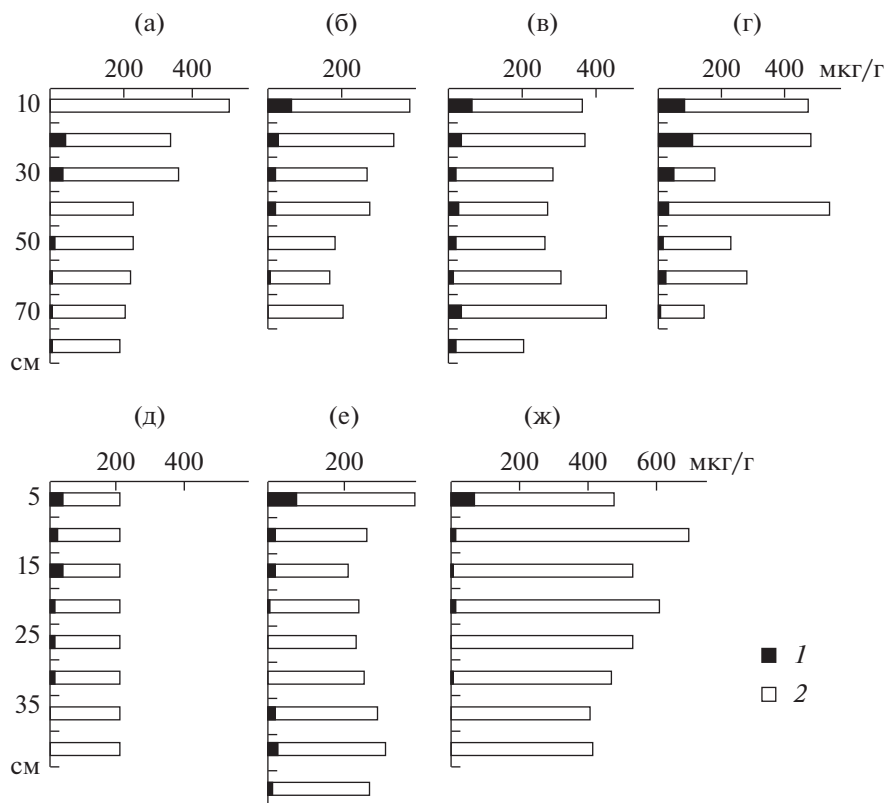
Сравниваемые слои	<i>t</i> -Стьюдента	Реальное значение	<i>p</i> , %
1 и 2	2.18	–1.08	–
1 и 3	2.18	–2.35	<5
1 и 4	2.18	–1.28	–
1 и 5	2.26	–4.85	<0.1
1 и 6	2.26	–3.81	<1
1 и 7	2.26	–2.46	<5
1 и 8	2.37	–6.18	<0.1
2 и 3	2.18	–0.94	–
3 и 4	2.18	0.93	–
4 и 5	2.26	–2.71	<5
5 и 6	2.45	0.43	–
6 и 7	2.45	0.04	–
7 и 8	2.78	–0.77	–

Примечание. *t*-Стьюдента – критическое значение *t*-критерия Стьюдента для *p* = 5%. Слои: 1 – 0–10 см; 2 – 10–20; 3 – 20–30; 4 – 30–40; 5 – 40–50; 6 – 50–60; 7 – 60–70; 8 – 70–80 см. *p* – уровень значимости. “–” – различия недостоверны.

(Состояние..., 2008). Сходство средних концентраций во все годы наблюдений свидетельствует о сохранении высокого уровня продуктивности первичного звена в озере.

Вертикальное распределение содержания растительных пигментов в донных отложениях изучают для восстановления исторических изменений продуктивности водоемов (Guilizzoni et al., 1983). Результаты нашей работы показали, что гипертрофный статус характерен для оз. Неро продолжительное время. Исходя из средней скорости осадконакопления (1 мм/год), возраст донных отложений в колонках 40–80 см соответствует ~400–800 годам. Различия между минимальной и максимальной величинами Хл + Ф в кернах на отдельных станциях варьируют в 2–3 раза (рис. 2). Абсолютный максимум достигает 704 мкг/г. Наибольшую по вертикали величину не всегда отмечали в верхнем слое (рис. 2), что может быть связано с неравномерным накоплением ОВ в донных отложениях разнотипных участков. В целом значения средних концентраций Хл + Ф в коротких колонках (40–45 см) были выше (280–523 мкг/г сухого осадка), чем в длинных (70–80 см) – 261–341. Послойное осреднение концентраций Хл + Ф для всех кернов одного горизонтального уровня позволило получить единый вертикальный профиль, характеризующийся положительным трендом изменений от нижнего слоя к верхнему (рис. 3). Во многих случаях различия концентраций пигментов в слоях, отражающие возрастание первичной продукции в многолетнем аспекте, статистически достоверны (табл. 3).

Одним из доказательств индикаторной значимости осадочных пигментов как продукционных показателей озера могут быть тесные зависимости пигментов с концентрациями органического вещества и биогенных элементов в донных отло-

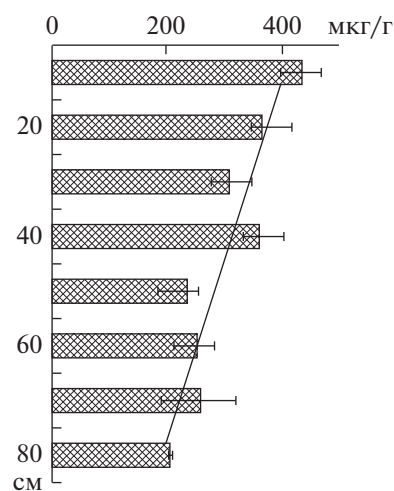


**Рис. 2.** Вертикальное распределение Хл (1) и Ф (2) (мкг/г сухого грунта) на разных глубинах (см) донных отложений оз. Неро: а, б, в, г, д, е, ж – ст. 4, 5, 7, 15, 2, 10, 12 соответственно.

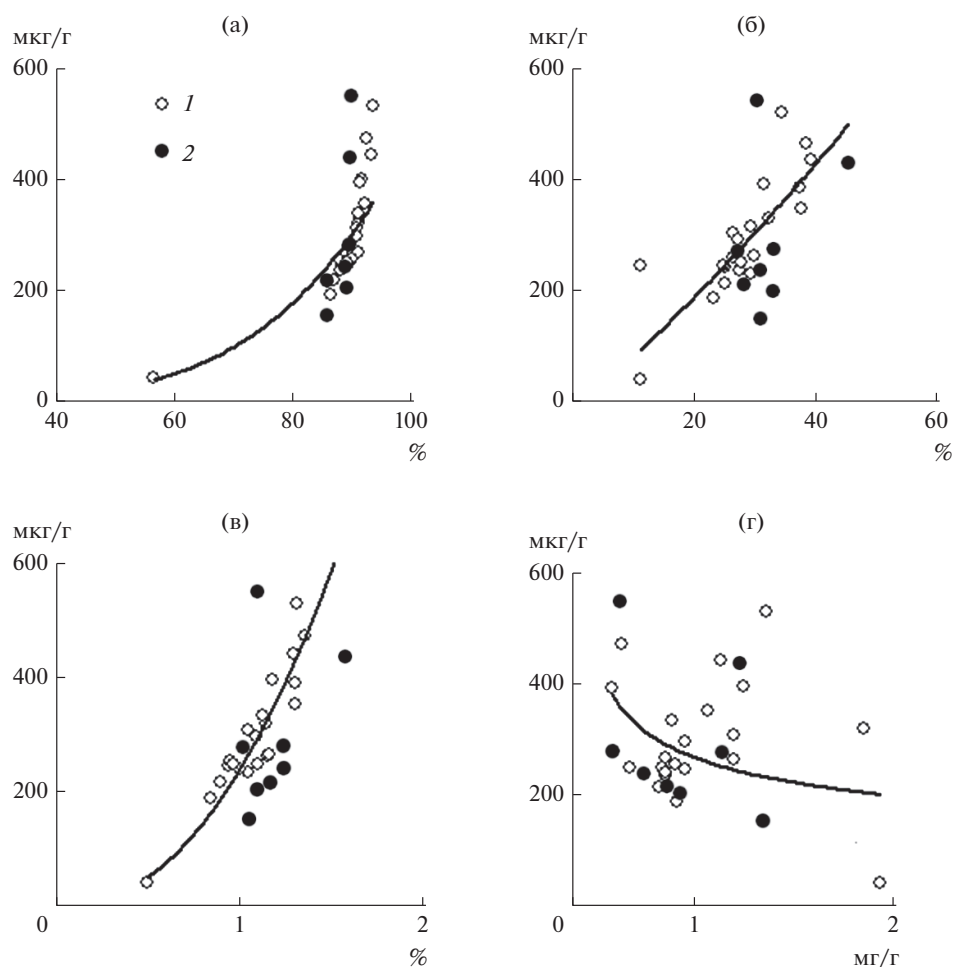
жениях. Корреляционный анализ показал, что концентрации Хл, Ф и Хл + Ф достоверно связаны с содержанием ОВ и общего азота (табл. 4), что отмечалось как по данным горизонтального распределения концентраций по площади дна, так и по вертикальному профилю донных отложений. Связь растительных пигментов с характеристиками донных отложений (за исключением общего фосфора) – степенная с высокими коэффициентами детерминации (рис. 4), это согласуется с соответствующими показателями, полученными для озер и водохранилищ (Timofeeva, Sigareva, 2004).

Коэффициенты вариации содержания Хл + Ф в донных отложениях сравнительно невысокие (2–50%) и в среднем составляют по горизонтальному распределению 29%, по вертикали – 31%, по отдельным слоям кернов – 27% (табл. 5). Такие величины заметно ниже коэффициентов вариации содержания осадочных пигментов в менее продуктивных искусственных водоемах – водохранилищах, где они достигают 200% (Сигарева, 2012). Даже в высокопродуктивном Влоцлавском водохранилище (на р. Висла) изменчивость концентраций осадочных пигментов выражена сильнее (57% по вертикали и 79% по площади дна) (Сигарева и др., 2017), чем в оз. Неро. Невысокие коэффициенты варьирования концентраций

пигментов в донных отложениях озера – признак однородности абиотических условий и сходства продуктивности на отдельных участках водоема.



**Рис. 3.** Среднее ( $\pm$  стандартная ошибка) содержание и линия тренда Хл + Ф (мкг/г) в слоях кернов сапропеля оз. Неро в 2017 г. Коэффициент связи ( $R^2$ ) Хл + Ф с глубиной донных отложений равен 0.82.



**Рис. 4.** Связи содержания Хл + Ф с влажностью (а), с содержанием ОВ (б), общего азота (в) и общего фосфора (г). 1 – слой 0–10 см, 2 – 30–70 см. Коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) для верхнего слоя составили 0.86, 0.61, 0.92 и 0.10 для а, б, в, г соответственно.

**Таблица 4.** Коэффициенты линейной корреляции ОВ и суммы (Хл + Ф) с другими пигментными характеристиками, концентрациями общего азота и фосфора для верхнего слоя донных отложений (0–10 см) на станциях и в кернах (0–70 см)

Показатели	0–10 см, $r_{0.05} = 0.43$		0–70 см, $r_{0.05} = 0.37$	
	ОВ, %	Хл + Ф	ОВ, %	Хл + Ф
Хл, мкг/г	0.57	0.76	0.38	0.72
Ф, мкг/г	0.81	0.99	0.67	0.99
Хл + Ф, мкг/г	0.81	1.00	0.66	1.00
$D_{480}/D_{665}$	0.04	0.00	–0.10	–0.18
$D_{480}/1.7D_{665к}$	0.02	0.00	–0.15	–0.17
Ф, %	0.17	0.08	0.23	–0.02
Хл, %	–0.17	–0.08	–0.23	0.02
Влажность грунта, %	0.67	0.72	0.60	0.63
Воздушно-сухая объемная масса, г/см <sup>3</sup>	–0.64	–0.69	–0.58	–0.59
Хл + Ф, мг/(м <sup>2</sup> · мм)	0.52	0.79	0.37	0.75
$N_{общ}$ , %	0.79	0.91	0.82	0.72
$P_{общ}$ , мг/г	–0.27	–0.17	–0.20	–0.19

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эвтрофирование – ключевой природный процесс, приводящий к сукцессии сообществ и всей экосистемы (Лазарева, 2010; Трифонова, 1986; Alimov, Golubkov, 2014). Однако, выявить признаки естественного эвтрофирования сложно, поскольку этот процесс имеет низкую скорость и сочетается с антропогенным эвтрофированием и цикличностью, обусловленной периодичностью климатических факторов (Даченко, 2007; Пырина и др., 2006; Alimov, Golubkov, 2014; Datsenko, 1998; Izmet'eva et al., 2011). В зависимости от абиотических условий обычно отмечают чередование увеличения и уменьшения продуктивности организмов первичного звена и других сообществ. При этом изменчивость интенсивности развития звеньев трофической цепи иногда необоснованно называют эвтрофированием и деэвтрофированием. Считается, что основные факторы эвтрофирования, приводящего к сукцессии сообществ и экосистемы в целом, – тип ландшафта и гене-

**Таблица 5.** Коэффициенты вариации (%) показателей содержания растительных пигментов в донных отложениях оз. Неро

Варианты	Хл + Ф, мкг/г	Хл + Ф, мг/(м <sup>2</sup> · мм)	Ф от (Хл + Ф), %	D <sub>480</sub> /D <sub>665</sub>
По площади дна (0–10 см)				
Все станции (1–16)	29.4	10.4	5.0	10.3
без макрофитов	21.8	9.2	4.6	7.5
с макрофитами	25.8	9.7	4.4	9.5
По вертикали в кернах				
Ст. 2, 0–40 см	43.3	24.7	7.2	10.5
Ст. 4, 0–80	36.6	6.5	4.7	7.4
Ст. 5, 0–70	30.1	22.3	5.7	8.5
Ст. 7, 0–80	23.4	26.2	3.5	7.2
Ст. 10, 0–45	18.1	11.6	5.9	8.6
Ст. 12, 0–40	19.1	21.8	4.8	4.8
Ст. 15, 0–70	47.0	37.6	8.5	16.7
По слоям кернов (ст. 2, 4, 5, 7, 10, 12, 15)*				
Толщина слоя, см				
0–10	22.6	11.7	7.0	10
10–20	36.1	16.7	7.2	10.2
20–30	33.8	26.3	8.8	14.4
30–40	31.6	30.6	4.6	14.9
40–50	14.6	22.1	2.6	7.6
50–60	24.5	32.5	3.6	10.3
60–70	50.1	36.4	4.2	11.3
70–80	1.6	25.8	5.1	0.8

\* Коэффициенты вариации рассчитаны для конкретного слоя осадка по всем вместе взятым указанным станциям.

зис территории (Черевичко, 2017). В то же время, выявлена эвтрофирующая роль внутренней биогенной нагрузки и гидробионтов, которые стимулируют продукционные процессы за счет экскреции фосфора (Alimov, Golubkov, 2014).

Рассмотреть вопрос о естественном эвтрофировании как о процессе, характеризующемся возрастанием интенсивности первичного продуцирования, можно лишь в геологических масштабах времени. Единственный подход, позволяющий проследить признаки естественного эвтрофирования – изучение вертикального профиля палеоиндикаторов в донных отложениях. В этом аспекте большое значение имеют растительные пигменты как показатели реализованной продукции органического вещества, в отличие от концентрации биогенных элементов – показателей потенциальной продуктивности. Количественные зависимости осадочных пигментов от концентрации Хл в воде и первичной продукции фитопланктона свидетельствуют о связи трофии ярусов экосистемы – бентали и пелагиали (Guilizzoni et al., 1983; Sigareva et al., 2013; Сигарева, 2012; Sigareva, Timofeeva, 2014; Cremona et al., 2016). При эвтрофировании

наблюдается повышение накопления ОВ на дне, приводящее к преобладанию илов в грунтовом комплексе высокопродуктивных водоемов, что показано на примере озер и водохранилищ Волжского бассейна (Сигарева, 2012).

Материалы настоящей работы, выполненной на оз. Неро, позволили утвердительно ответить на вопрос, имеет ли место естественное эвтрофирование озер. Другие изменения продуктивности оз. Неро, связанные с антропогенным эвтрофированием и динамикой климатических условий, были выявлены ранее по показателям развития фитопланктона и макрофитов (Сиделев и др., 2008; Состояние..., 2008).

**Выводы.** Полученные результаты по осадочным пигментам в оз. Неро позволили выявить ряд признаков естественного эвтрофирования. Содержание растительных пигментов в донных отложениях незначительно варьирует во времени и пространстве и характеризует озеро как гипертрофное. По концентрации Хл + Ф в донных отложениях оз. Неро продолжает занимать лидирующее положение среди изученных водоемов Верхне-Волжского бассейна. Экосистема озера

по-прежнему находится на последней стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии, после которой следует заболачивание. Длительный период последнего этапа сукцессии озера и положительный тренд к настоящему времени свидетельствуют о преимущественном влиянии на продуктивность естественных природных факторов, а не антропогенных. Оценка состояния продукционных свойств водоема и выявление типа эвтрофирования имеет особое значение, поскольку от этого зависит характер водоохранных мероприятий, направленных на оздоровление озера на ближайшее столетие.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариушкина Е.В.* 1970. Руководство по химическому анализу почв. Москва: МГУ.
- Борисов В.А., Успенская О.Н., Гренадеров Н.В., Васючков И.Ю.* 2014. Состав органического вещества разных видов сапропелей // *Агрехимия*. № 8. С. 51.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П.* 1975. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Ленинград: Наука.
- ГОСТ 26107-84. 1984. Почвы. Методы определения общего азота.
- Даценко Ю.С.* 2007. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. Москва: ГЕОС.
- Лазарева В.И.* 2010. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.
- Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К.* 2014. Геохимические особенности голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета*. Т. 325. № 1. С. 83.
- Мартынова М.В., Шмидеберг Н.А.* 1983. О методах определения различных форм фосфора в донных наносах // *Гидрохимические материалы*. Т. 85. С. 49.
- Платонов В.А., Хадарцев А.А., Фридзон К.Я., Чуносков С.Н.* 2014. Химический состав и биологическая активность сапропеля оз. Глубокое (Татарстан) // *Вестник новых медицинских технологий*. Т. 21. № 3. С. 199.
- Пырина И.Л., Литвинов А.С., Кучай Л.А. и др.* 2006. Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона Рыбинского водохранилища в связи с действием климатических факторов // *Состояние и проблемы продукционной гидробиологии*. Москва: Товарищество науч. изданий КМК. С. 36.
- Сигарева Л.Е.* 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В., Гершевский П.* 2017. Оценка вариабельности трофического состояния Влоцлавского водохранилища по осадочным пигментам // *Вода: химия и экология*. № 2. С. 3.
- Сиделев С.И., Бабаназарова О.В., Рычкова Е.Н.* 2008. Многолетние изменения концентраций хлорофилла *a* в мелководном высокоэвтрофном озере // *Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия*. Вологда: Центр оперативной полиграфии "Коперник". С. 102.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. 2008. Москва: Наука.
- Трифонов И.С.* 1986. Сезонная и основная сукцессия озерного фитопланктона // *Гидробиол. ж.* Т. 22. № 3. С. 21.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.* 1990. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Черевичко А.В.* 2017. Сукцессия зоопланктона заболоченных озер и болот озерного происхождения // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. № 79(82). С. 278.
- Alimov A.F., Golubkov M.S.* 2014. Lake eutrophication and community structure // *Inland Water Biology*. V. 7. № 3. P. 185. <https://doi.org/10.1134/S1995082914030031>
- Bul'on V.V.* 1998. Does natural eutrophication of lakes occur? // *Water Resources*. V. 25. № 6. P. 701.
- Cremona F., Laas A., Arvola L. et al.* 2016. Numerical exploration of the planktonic to benthic primary production ratios in lakes of the Baltic Sea catchment // *Ecosystems*. V. 19. P. 1386. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0006-y>
- Datsenko Yu.S.* 1998. Comment on "Does natural eutrophication of lakes occur?" by V.V. Bul'on // *Water Resources*. V. 25. № 6. P. 707.
- Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. 1982. Paris: OECD.
- Gebrehiwot M., Kifle D., Stiers I., Triest L.* 2017. Phytoplankton functional dynamics in a shallow polymictic tropical lake: the influence of emergent macrophytes // *Hydrobiologia*. V. 797. № 1. P. 69. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3161-z>
- Guilizzoni P., Bonomi G., Galanti G., Ruggiu D.* 1983. Relationship between sedimentary pigments and primary production; evidence from core analyses of twelve Italian lakes // *Hydrobiologia*. V. 103. № 1. P. 103. <https://doi.org/10.1007/BF00028436>
- Izmes'teva L.R., Silow E.A., Litchman E.* 2011. Long-term dynamics of lake Baikal pelagic phytoplankton under climate change // *Inland Water Biology*. V. 4. № 3. P. 301. <https://doi.org/10.1134/S1995082911030102>
- Kurzo B.V., Navosha Yu.Yu., Strigutskii V.P.* 2017. Formation of sapropel in the lakes of Belarus // *Solid Fuel Chem.* V. 51. № 5. P. 326. <https://doi.org/10.3103/S0361521917050032>
- Lorenzen C.J.* 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // *Limnol., Oceanogr.* V. 12. № 2. P. 343. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>
- Möller W.A.A., Scharf B.W.* 1986. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the



- Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia*. V. 143. № 1. P. 327. <https://doi.org/10.1007/BF00026678>
- Sánchez M.L., Rodríguez P., Torremorell A.M. et al.* 2017. Phytoplankton and periphyton primary production in clear and turbid shallow lakes: Influence of the light environment on the interactions between these communities // *Wetlands*. V. 37. № 1. P. 67. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0840-x>
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A.* 2014. The phytoplankton role in formation of bottom sediment productivity in a large reservoir in the years with different temperature conditions // *Phytoplankton: biology, classification and environmental impacts*. New York: Nova Sci. Ch. 6. P. 151.
- Sigareva L.E., Zakonov V.V., Timofeeva N.A., Kas'yanova V.V.* 2013. Sediment pigments and silting rate as indicators of the trophic condition of the Rybinsk reservoir // *Water Resources*. V. 40. № 1. P. 54. <https://doi.org/10.1134/S0097807813010090>
- Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E.* 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes // *Hydrobiologia*. V. 506. № 1–3. P. 135. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd>
- Stankevica K., Klavins M., Rutina L., Cerina A.* 2014. Lake Sapropel: a valuable resource and indicator of lake development // *Advances in Environment, Computational Chemistry and BioScience*. Montreux: WSEAS Press. P. 247.
- Strakhovenko V.D., Taran O.P., Ermolaeva N.I.* 2014. Geochemical characteristics of the sapropel sediments of small lakes in the Ob'-Irtysh interfluvium // *Russian Geology and Geophysics*. V. 55. № 10. P. 1160. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.09.002>
- Timofeeva N.A., Sigareva L.E.* 2004. Relationships between the concentrations of phyto-pigments, nitrogen, and phosphorus in bottom deposits of water reservoirs // *Water Resources*. V. 31. № 3. P. 303. <https://doi.org/10.1023/B:WARE.0000028700.50699.5f>
- Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Romanov R.E. et al.* 2016. Hydrobiological conditions of sapropel formation in lakes in the south of Western Siberia // *Water Resources*. V. 43. № 1. P. 129. <https://doi.org/10.1134/S0097807816010073>

## Features of Natural Eutrophication of Shallow Lake Nero Based on Sedimentary Pigments

L. E. Sigareva<sup>1,\*</sup>, N. A. Timofeeva<sup>1</sup>, V. V. Zakonov<sup>1</sup>,  
A. G. Rusanov<sup>2</sup>, N. V. Ignatyeva<sup>2</sup>, and Sh. R. Pozdnyakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

\*e-mail: sigareva@ibiw.yaroslavl.ru

Based on bottom survey of 2017, the data of spectrophotometric determination of plant pigments in bottom sediments of Lake Nero are analyzed. A low variability ( $CV = 27-31\%$ ) of concentrations of chlorophyll *a* and pheopigments over the bottom area and in the sapropel cores is established. The values of the pigment concentrations in bottom sediments of the lake belong to the hypertrophic category. The hypertrophic state of the lake according to pigment content ( $>300 \mu\text{g/g}$  dry sediment) has been over the period of formation of sapropel layer of 80 cm (about 800 years). The trends of the increase in concentrations of plant pigments from the lower to upper layers of cores are revealed, with a close significant relationship with the contents of organic matter and total nitrogen, which indicates a natural eutrophication of the lake.

**Keywords:** chlorophyll, pheopigments, sapropel, lake Nero, eutrophication