

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ И ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КРУПНЫХ МЕЛКОВОДНЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

© 2022 г. Л. Е. Сигарева^а, *, Н. А. Тимофеева^а, В. В. Законнов^а

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок, 109, Некоузский р-н, Ярославская обл., 152742 Россия

*e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принята к публикации 27.04.2022 г.

Получены первые данные о распределении растительных пигментов в разнотипных донных отложениях крупных мелководных озер Воже и Лача (Северо-Запад России). Закономерности распределения хлорофилла *a* с феопигментами и органического вещества в поверхностных отложениях согласуются с особенностями седиментации. Среди процессов осадконакопления в оз. Воже доминируют размыв ложа, перенос взвеси и переотложение, в оз. Лача – седиментация. В оз. Воже преобладают крупнозернистые наносы и сильнее выражена мозаичность грунтового комплекса по сравнению с оз. Лача. В обоих озерах продукционные показатели однотипных грунтов характеризуются сходными величинами. Пространственное распределение хлорофилла *a* с продуктами его деградации в бентали оз. Воже более неоднородно, чем в оз. Лача. Вклад продуктов разрушения хлорофилла в донных отложениях исследуемых озер составляет около 60%. Среднее содержание органического вещества, рассчитанное с учетом площадей разнотипных грунтов, в отложениях оз. Воже ($11.8 \pm 2.7\%$) в 2.3 раза меньше, чем в оз. Лача ($27.4 \pm 5.5\%$). Средние концентрации хлорофилла с феопигментами характеризуют оз. Воже как типично мезотрофный водоем (38.3 ± 9.3), оз. Лача – эвтрофный в начальной стадии (72.2 ± 17.7 мкг/г сухого осадка). Углерод растений, рассчитанный по содержанию осадочных пигментов, составляет незначительную долю от суммарной первичной продукции фитопланктона, перифитона и макрофитов (в оз. Воже – 0.38%, в оз. Лача – 0.46%) и соответствует 5.3–6.5% общего органического углерода отложений. При отсутствии антропогенного загрязнения в озерах были выявлены признаки эвтрофирования, обусловленные трансграничным переносом и поступлением с водосбора биогенных элементов в условиях потепления климата.

Ключевые слова: хлорофилл, феопигменты, органическое вещество, донные отложения, озера Воже и Лача, трофическое состояние, ранний диагенез

DOI: 10.31857/S0016752522100089

ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху глобальных климатических изменений и антропогенных воздействий наиболее остро обозначилась проблема сохранения и устойчивого развития окружающей среды. В связи с этим востребованы альтернативные концепции об определяющей роли, с одной стороны – биоты, а с другой стороны – природных условий в регуляции состояния окружающей среды (Савенко, 2003, 2011). При анализе факторов эволюции актуальна проблема биогеохимической гетерогенности биосферы, изучение которой необходимо для выявления закономерностей формирования “парникового эффекта” и разработки параметров для экологического нормирования (Башкин и др., 1993; Ветров, Романкевич, 2001; Китаев, 2007; Романкевич и др., 2009). В этом аспекте донные отложения (ДО) водоемов

представляют интерес как биокосная система, формирующаяся при взаимодействии биотических и абиотических компонентов (Савенко, 2011; Leavitt, 1993; Reuss et al., 2010). Донные отложения аккумулируют вещества различного происхождения. Депонирование органического вещества (ОВ) способствует удалению углерода из биотического круговорота и уменьшению его концентрации в атмосфере. Аккумуляция ОВ в ДО зависит от трофического статуса водоема (Белкина, 2011).

Среди показателей синтезированного при фотосинтезе ОВ особое место занимают растительные пигменты, прежде всего хлорофилл *a*. Закономерности вертикального распределения растительных пигментов в ДО водоемов – теоретическая основа восстановления интенсивности первичной продукции ОВ в исторических масштабах време-

ни (Szymczak-Żyła, Kowalewska, 2009; Reuss et al., 2010; Tse et al., 2015). Особенности пространственного распределения пигментов в поверхностных слоях отложений учитываются при оценках современного трофического состояния бентосных биотопов (Номоконова, 2009, 2011; Сигарева и др., 2019; Möller, Scharf, 1986). К настоящему времени получен большой фактический материал по растительным пигментам в разнотипных водоемах (Сигарева, 2012; Смольская и др., 2018; Freiberg et al., 2011; Cotovicz. et al., 2018; Koomklang et al., 2018), но причины и факторы вариабельности содержания пигментов изучены недостаточно.

Особый интерес вызывают растительные пигменты в крупных мелководных озерах, в которых водная толща находится только в эвфотической зоне, и поэтому закономерно ожидать, что такие озера накапливают большое количество ОВ, способствующего загрязнению воды (Гидробиология..., 1978; Гидрология..., 1979; Катанская, Летанская, 1986; Распов, 2005; Филоненко, Комарова, 2015; Новоселов и др., 2017). При усиливающемся эвтрофировании мелководные озера находятся под угрозой исчезновения. Необходимость сохранения северных озер, составляющих 89.4% всех озер в РФ, обусловлена тем, что они могут стать источниками пресной воды для мировых рынков (Румянцев и др., 2005).

Цель работы – изучить закономерности пространственного распределения растительных пигментов и ОВ в поверхностном слое ДО в крупных мелководных озерах Воже и Лача, различающихся процессами осадкообразования, выявить признаки трансформации ОВ на раннем этапе диагенеза (литогенеза), оценить трофическое состояние озер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы ДО отбирали в 2015 г. с помощью портативного дночерпателя (лот с храпцом) из верхнего 5-сантиметрового слоя на 76 станциях в оз. Воже и 69 станциях в оз. Лача. Места отбора проб – поперечные разрезы, прибрежные участки: на границе воздушно-водной растительности, в зарослях погруженной, истоке и устье р. Свидь, соединяющей озера, а также в истоке р. Онега, вытекающей из оз. Лача (рис. 1). Растительные пигменты определяли спектрофотометрическим методом в 90% ацетоновом экстракте на спектрофотометре Lumbda 25 Perkin Elmer. Концентрацию хлорофилла *a* (Хл) и продуктов его деградации – феопигментов (Ф) рассчитывали по уравнениям Лоренцена для фитопланктона (Lorenzen, 1967) с некоторыми модификациями. Соотношение каротиноиды/хлорофилл оценивали по индексу E_{480}/E_{665} , исходя из оптических плотностей экстракта на длинах волн 480 и 665 нм после вычитания поправки на неспецифическое поглощение при 750 нм. Естественную влажность ДО – по

разнице массы воды в сырых и высушенных при 60°C образцах грунта. Воздушно-сухую объемную массу отложений рассчитывали по (Сигарева, Тимофеева, 2004). Содержание ОВ – по потере массы ДО после прокаливании при 600°C. Гранулометрический состав образцов грунта определяли методом мокрого рассева на электромагнитной просеивающей установке “Analysette-3” фирмы Alfred Fritsch (Германия) с насадкой прецизионных микросит. Тип грунта устанавливали по гранулометрическому составу с учетом естественной влажности, воздушно-сухой объемной массы, содержания ОВ (Буторин и др., 1975). Трофическое состояние бентали оценивали по осадочным пигментам в различных типах ДО согласно (Möller, Scharf, 1986).

Озера Воже (координаты: 60°59'6.13" N, 39°07'7.51" E) и Лача (координаты: 61°32'8.609" N, 38°7.38'18.3" E) расположены на территории Вологодской и Архангельской областей, они формируют водные массы крупнейшей на северо-западе России р. Онеги, впадающей в Белое море (Гидрология..., 1979). Водосборный бассейн озер Воже и Лача представляет собой озерно-ледниковую равнину с густой сетью речных, местами заболоченных долин. Залесенность составляет 77%, сельскохозяйственные угодья занимают около 8%. Площадь оз. Воже – 418 км², длина 48 км, средняя ширина 9 км, объем 0.599 км³. Площадь оз. Лача – 345 км², длина 33 км, средняя ширина 10 км, объем 0.543 км³. Средняя глубина оз. Воже 1.4 м, оз. Лача – 1.6 м, максимальные глубины не превышают 5 м. Небольшие по площади понижения рельефа дна связаны с карстовыми явлениями. Коэффициент условного водообмена оз. Воже – 3.5, оз. Лача – 7 год⁻¹.

Донные отложения оз. Воже в южной части представлены илами серовато-бурого цвета с темным наилком, в северной части озера грунты песчано-глинистые, по гранулометрическому составу – средне- и мелкозернистые пески. Северный и южный районы озера различаются по условиям осадкообразования. В северной части озера преобладают пески толщиной около 20 см, в южной – илы до 2 м на бело-голубой ледниковой глине. Мелкоалевритовые илы занимают 49% площади озера, крупноалевритовые – 3%, остальная площадь (48%) занята песчаными, песчано-глинистыми, глинистыми и каменистыми грунтами. Процессы переноса взвеси в оз. Воже преобладают над седиментацией из-за интенсивной гидродинамической активности за счет ветровых и стоковых течений.

Структура ДО в оз. Лача более однородна: 88% площади занимают мелкоалевритовые илы, достигающие 3-метровой толщины, 12% – песчаные и каменистые отложения. Процессы седиментации в этом озере, в отличие от оз. Воже, преобладают над переносом взвеси. Скорость

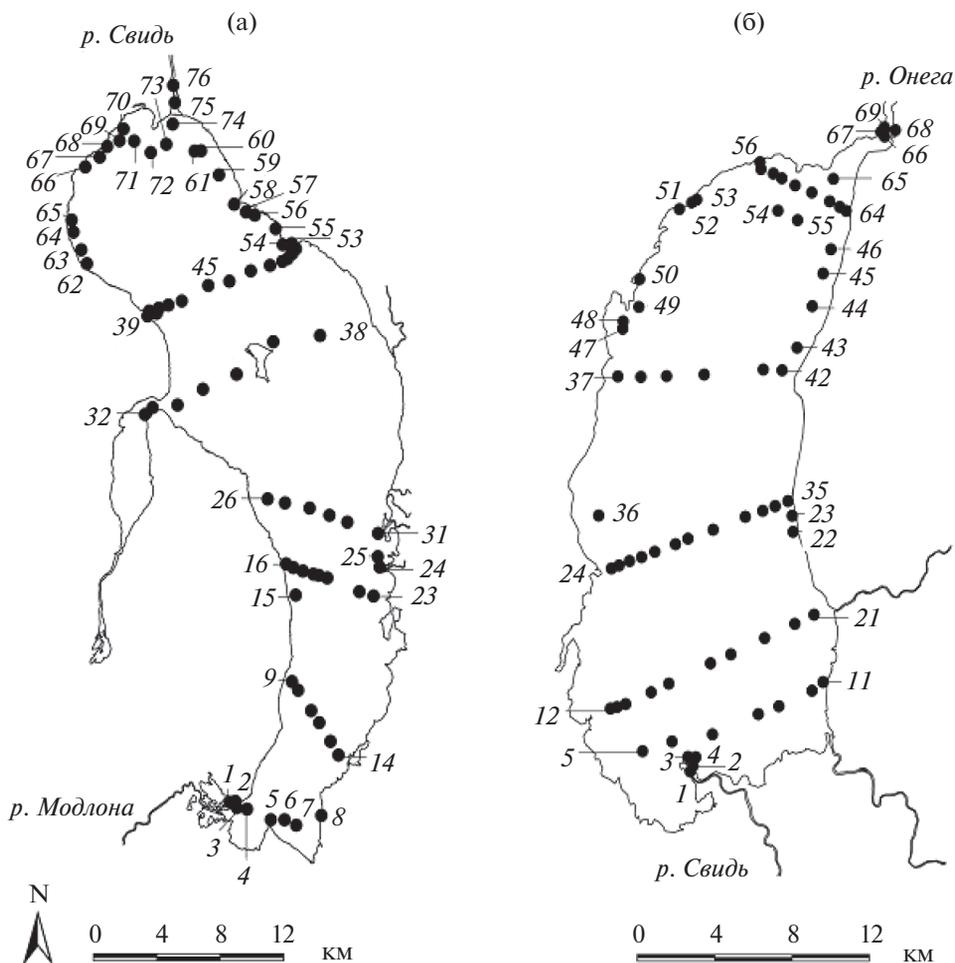


Рис. 1. Схема расположения станций на озерах Воже (а) и Лача (б).

илонакопления в оз. Лача 0.2–0.4 мм/год. Средневзвешенное содержание ОВ в отложениях оз. Воже – 8.5, оз. Лача – 19.6% (Гидрология..., 1979). Структура грунтового комплекса (по данным съемки в 2015 г.) практически сохранилась прежней за 40-летний период (Отчет..., 2015).

Цветность воды оз. Воже варьирует от 196 до 44°, оз. Лача – 79–32° Рт-Со шкалы. Значения рН воды чаще всего >7, насыщение воды кислородом >100%. Содержание органического фосфора в оз. Воже 0.019–0.038 мг/л, в оз. Лача достигает 0.052 мг/л.

Зарастаемость высшей водной растительностью озер Воже и Лача 18.3 и 45% в 1973 г. и 26 и 70% в 2015 г., соответственно (Гидробиология..., 1978; Отчет..., 2015). Процессы зарастания наиболее интенсивны в устьевых заливах рек, менее интенсивны на мелководьях, удаленных от мест непосредственного поступления биогенных элементов с речными водами.

Содержание тяжелых металлов в керне (длинной 90 см) оз. Воже соответствует фоновым (кларковым) значениям и варьирует в пределах: Ni – от 8 до 19.3, Cu – от 6.4 до 8.8, Zn – от 16.4 до

47.1, Cd – от 0.04 до 0.4, Pb – от 2.8 до 10.8 мкг/г (Гапеева и др., 2018).

Первичная продукция фитопланктона, перифитона и макрофитов в оз. Воже (43, 6.2, 35 г С/м²) меньше, чем в оз. Лача (59, 43.7, 60 г С/м²). Концентрация Хл в планктоне озер характеризуется сходными величинами: в оз. Воже 2.0–6.4, в оз. Лача – 1.4–6.1 мкг/л. По показателям развития фитопланктона, зоопланктона и зообентоса озера Воже и Лача относятся к мезотрофным (Гидробиология..., 1978; Катанская, Летанская, 1986; Болотова и др., 1996; Китаев, 2007; Ивичева, Филоненко, 2015). Последние комплексные исследования показали, что по биомассе фитопланктона озера сходны и считаются мезотрофными (Корнева и др., 2021), по зоопланктону преобладают значения в оз. Воже (Лазарева, Сабитова, 2021), по макрозообентосу – оз. Лача (Пряничникова, 2021).

Климат в районе озер – умеренно-континентальный, с продолжительной мягкой зимой и умеренно теплым летом. Температура воды изменяется однородно по глубине и акватории озер. Среднего-

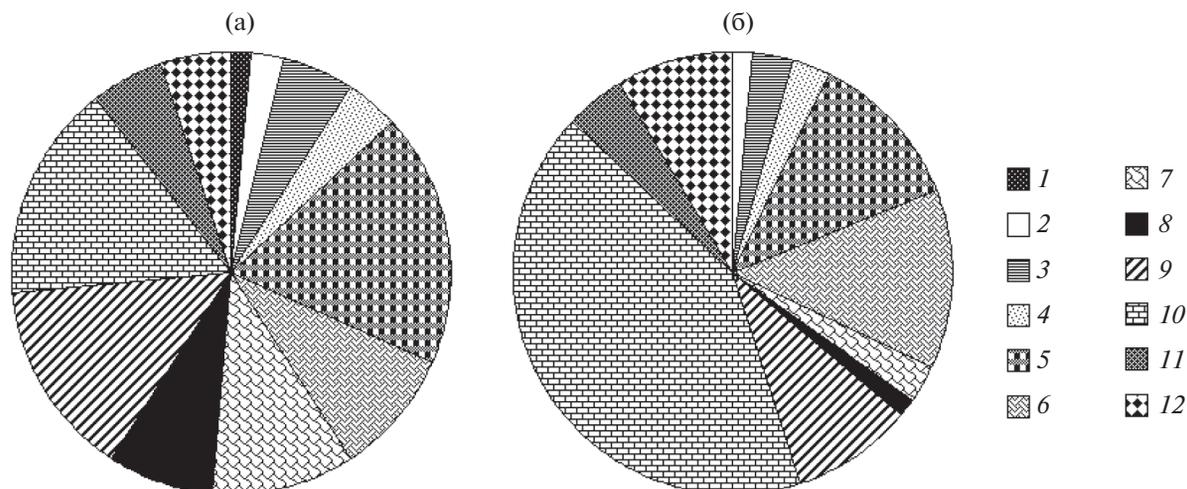


Рис. 2. Типы донных отложений озер Воже (а) и Лача (б), % встречаемости. 1 – галька, гравий, 2 – крупный песок, 3 – средний песок, 4 – мелкий песок, 5 – илистый песок, 6 – песчанистый ил, 7 – наиллок, 8 – глина, 9 – серый ил, 10 – оливковый ил, 11 – торфянистый ил, 12 – отложения из макрофитов.

довая скорость ветра 3.9 м/с. Из-за ветрового режима в озерах меняется направление течения в безледный период. Преобладающие течения ветровые. Скорость поверхностных течений – 7–10 см/с, на оз. Воже достигает 17 см/с, на оз. Лача – 13 см/с (Гидрология..., 1979).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Температура воды в июне 2015 г. была типичной для исследуемых водоемов (15.5–18.2°C в оз. Воже и 12.3–14.1°C – оз. Лача). Содержание кислорода не различалось: 10.1 ± 0.2 и 10.6 ± 0.1 мг/л, 102.4 ± 1.3 и $101 \pm 1.15\%$ насыщения, соответственно (Отчет..., 2015). Отношение глубин на станциях (в оз. Воже 1.8 ± 0.1 м, оз. Лача – 1.7 ± 0.1 м) к прозрачности воды (66 ± 6 см в оз. Воже, 43 ± 4 см в оз. Лача) отражает световые условия, благоприятные для развития планктонных и бентосных растительных сообществ, включая микрофитобентос, перифитон и высшую водную растительность. Пространственное распределение исследованных характеристик по площади дна существенно различалось в связи со структурой грунтового комплекса.

В собранных образцах грунта выявлено по 12 одинаковых для озер типов ДО: галька-гравий, крупный, средний и мелкий песок, илистый песок, песчанистый ил, наиллок, глина, серый ил, оливковый ил, торфянистый ил и отложения из макрофитов (рис. 2). Среди наиболее часто отмечаемых типов грунта в оз. Воже – илистый песок (18%), серый ил (15%) и оливковый ил (16%), в оз. Лача – илистый песок (12%), песчанистый ил (13%) и оливковый ил (42%). Наличие временного наиллка на бело-голубой глине было отмечено в оз. Воже в 11% случаев, оз. Лача – 3%. Приведенные данные подтверждает более сильную изменчивость структуры ложа в первом озере.

Концентрации Хл и продуктов его разрушения – Ф в верхнем 5-см слое ДО варьировали в оз. Воже в пределах 0.3–277.3, оз. Лача – 0.7–189.9 мкг/г сухого осадка (с.о.) (рис. 3). Распределение пигментов в оз. Воже неравномерное и характеризовалось в целом преобладанием повышенных концентраций Хл + Ф в южной части. Однако максимальная концентрация пигментов (113 мкг/г с.о.) отмечалась в северной части озера в истоке р. Свидь. При впадении р. Свидь в оз. Лача концентрация Хл + Ф составляла 30 мкг/г с.о. и в южной части озера достигала 57–85 мкг/г с.о. Северная часть озера Лача, включая район, близкий к истоку р. Онеги, а также северо-западное побережье характеризовались наиболее высокими концентрациями осадочных пигментов. Среднее содержание Хл + Ф в оз. Воже – 36.6 ± 5.5 , оз. Лача – 71.9 ± 5.7 мкг/г с.о. Изменчивость концентраций пигментов в оз. Воже выражена сильнее ($C_v = 130\%$), чем в оз. Лача ($C_v = 65\%$).

Хлорофилл *a* в ДО озер представлен преимущественно продуктами деградации – Ф. В целом, величины относительного содержания Ф охватывают весь диапазон – от сравнительно невысоких, характерных для функционирующих растительных сообществ, до высоких, свойственных детриту. Так, в оз. Воже содержание Ф (в сумме с Хл) изменяется от 15 до 100%, в оз. Лача – от 19 до 89%. Средний для разрезов вклад Ф изменяется от 35 до 81% в оз. Воже и от 25 до 78% в оз. Лача. Средний вклад продуктов деградации Хл в отложениях исследуемых озер (60%) больше, чем обычно отмечают в фитопланктоне эвфотической зоны (20–30%) и меньше, чем в глубоких слоях отложений разнотипных водоемов (80–90%). Соотношение между концентрациями каротиноидов и Хл (E_{480}/E_{665}), как правило, превышающее 1.00, тоже свидетельствует о сильном

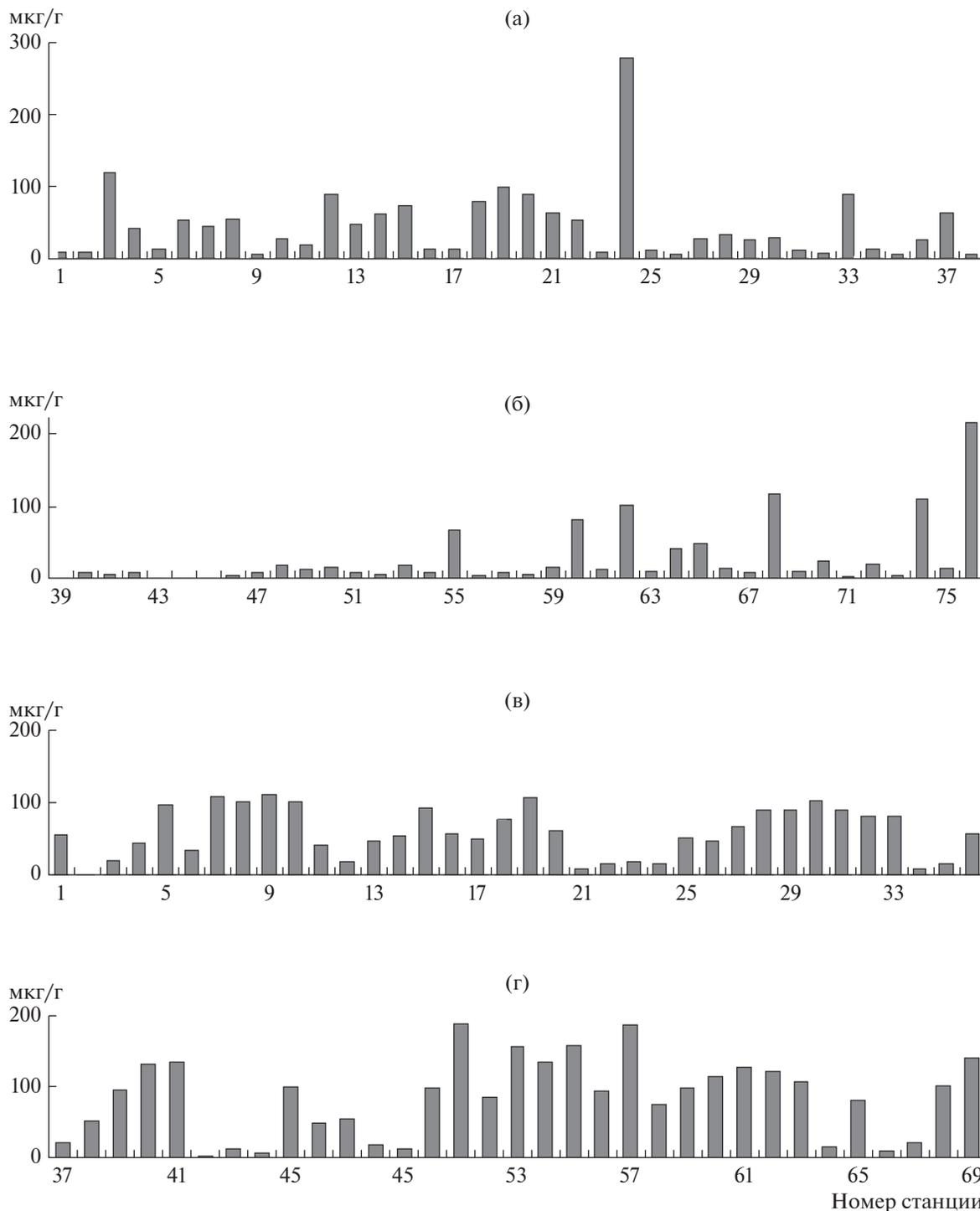


Рис. 3. Концентрации растительных пигментов в донных отложениях (Хл + Ф, мкг/г сухого грунта) на станциях озер Воже (а, б) и Лача (в, г). Обозначения: а, в – нижние части озер, б, г – верхние части озер.

разрушении пигментов в ДО. Концентрации Ф и Хл связаны между собой прямой положительной зависимостью ($R^2 = 0.40$ в оз. Воже и 0.24 в оз. Лача). Более тесная связь выявлена между показателями деградации Хл и каротиноидов – процентным содержанием Ф и индексом E_{480}/E_{665} (коэффициенты детерминации R^2 составили 0.47 в

оз. Воже и 0.81 в оз. Лача). Показатели деградации в целом соответствуют представлениям о более высокой скорости разрушения Хл по сравнению с общими каротиноидами.

Однотипные грунты исследованных озер практически не различаются по средним концентрациям Хл + Ф, но в ряде случаев в оз. Лача ха-

Таблица 1. Влажность, воздушно-сухая объемная масса грунта и содержание органического вещества в разнотипных отложениях озера Воже и Лача. Съемка 2015 г.

Тип грунта	Число проб	Влажность, %		Объемная масса, г/см ³		ОВ, %	
		среднее ± ошибка	C _v , %	среднее ± ошибка	C _v , %	среднее ± ошибка	C _v , %
1. Галька	<u>1</u>	<u>25.1</u>	–	<u>1.42</u>	–	<u>3.1</u>	–
	–	–	–	–	–	–	–
2. Песок	<u>9</u>	<u>24.2 ± 2.0</u>	<u>23</u>	<u>1.47 ± 0.07</u>	<u>14</u>	<u>2.2 ± 0.3</u>	<u>40</u>
	5	27.1 ± 1.5	11	1.36 ± 0.05	8	1.6 ± 0.3	36
3. Илистый песок	<u>14</u>	<u>32.7 ± 2.3</u>	<u>25</u>	<u>1.19 ± 0.07</u>	<u>20</u>	<u>3.4 ± 0.3</u>	<u>32</u>
	8	36.0 ± 2.3	17	1.08 ± 0.06	16	5.0 ± 0.9	49
4. Песчанистый ил	<u>7</u>	<u>29.5 ± 2.8</u>	<u>23</u>	<u>1.29 ± 0.09</u>	<u>17</u>	<u>6.2 ± 1.2</u>	<u>48</u>
	9	56.4 ± 7.2	36	0.67 ± 0.15	63	13.6 ± 2.5	51
5. Наиллок	<u>8</u>	<u>44.2 ± 7.6</u>	<u>45</u>	<u>0.95 ± 0.19</u>	<u>53</u>	<u>10.5 ± 0.9</u>	<u>23</u>
	2	81.4 ± 2.4	3	0.21 ± 0.03	14	23.6 ± 3.1	13
6. Глина	<u>6</u>	<u>38.2 ± 4.5</u>	<u>26</u>	<u>1.04 ± 0.13</u>	<u>28</u>	<u>12.8 ± 2.1</u>	<u>38</u>
	1	67.2	–	0.3	–	0.7	–
7. Серый ил	<u>11</u>	<u>70.9 ± 2.5</u>	<u>11</u>	<u>0.36 ± 0.04</u>	<u>33</u>	<u>16.0 ± 2.0</u>	<u>39</u>
	6	77.8 ± 4.5	13	0.27 ± 0.06	54	25.3 ± 2.5	22
8. Оливковый ил	<u>12</u>	<u>75.1 ± 2.2</u>	<u>10</u>	<u>0.30 ± 0.03</u>	<u>35</u>	<u>20.0 ± 2.3</u>	<u>38</u>
	29	85.1 ± 0.4	3	0.16 ± 0.01	18	31.6 ± 0.6	11
9. Торфянистый ил	<u>4</u>	<u>69.5 ± 4.0</u>	<u>10</u>	<u>0.38 ± 0.06</u>	<u>26</u>	<u>23.3 ± 2.8</u>	<u>21</u>
	3	75.6 ± 5.7	11	0.29 ± 0.08	39	36.4 ± 1.2	5
10. Макрофитный ил	<u>4</u>	<u>71.8 ± 12.4</u>	<u>30</u>	<u>0.39 ± 0.22</u>	<u>96</u>	<u>34.6 ± 2.4</u>	<u>12</u>
	6	80.5 ± 1.9	5	0.22 ± 0.02	25	46.7 ± 2.2	10

Примечания. Здесь и в табл. 2 над чертой – данные по оз. Воже, под чертой – оз. Лача, прочерк – нет данных.

рактируются более высоким содержанием пигментов, чем в оз. Воже (табл. 1, 2). В наилке оз. Лача содержание Хл + Ф более чем в 2 раза выше, чем оз. Воже (табл. 1, 2). Песок и илистый песок включают более высокое относительное содержание Хл и менее значительный вклад каротиноидов, судя по индексу E_{480}/E_{665} , чем в других разнотипных илах обоих озер (табл. 1, 2). При этом в песках отмечены минимальное содержание ОВ (1.6–5%), низкая влажность и высокая воздушно-сухая объемная масса.

Содержание ОВ в отложениях оз. Воже изменяется в пределах 1.1–37.9%, оз. Лача – 0.9–54.9%. Среднее содержание ОВ, рассчитанное с учетом площадей разнотипных грунтов, в отложениях оз. Воже $11.8 \pm 2.7\%$, в оз. Лача $27.4 \pm 5.5\%$. В целом, ДО в оз. Лача характеризуются более высокой влажностью (69%), чем в оз. Воже (49%) (табл. 1, 2). Воздушно-сухая объемная масса ДО в оз. Лача ниже (0.46 г/см^3), чем в оз. Воже (0.85 г/см^3). Между концентрацией пигментов и влажностью грунтов выявлена положительная зависимость, характеризующаяся высокими коэффициентами корреляции (0.74 в оз. Воже и 0.75 в оз. Лача) (рис. 4, 5). Связь пигментов с объемной массой – нелинейная отрицательная с коэффициентами корреляции -0.68 в оз. Воже и -0.73 в оз. Лача. Тесная положительная связь ($R^2 = 0.67$) выявлена между концентрацией пигментов и содержанием ОВ.

Среднее содержание Хл + Ф в слое отложений в расчете на 1 мм составило 15.2 ± 1.1 в оз. Воже и $18.1 \pm 1.1 \text{ мг/м}^2\text{мм}$ в оз. Лача. На примере оз. Лача отмечено, что концентрация пигментов в среднегодовом слое ДО (0.4 мм) составляет 7.2 мг/м^2 , а в водной толще (при глубине 1.6 м и концентрации Хл 5.5 мкг/л), приведенной в работе (Катанская, Летанская, 1986), – 8.8 мг/м^2 . Сходство содержания пигментов в воде и среднегодовом слое отложений, оцененное таким же способом, отмечалось для водоемов волжского бассейна (Сигарева, 2012).

Наиболее часто встречаемые концентрации Хл + Ф в оз. Воже относятся к олиготрофным и мезотрофным величинам, а оз. Лача – мезотрофным и эвтрофным (рис. 6). Среднее содержание пигментов (с учетом соотношения площадей разнотипных грунтов) в оз. Воже – 38.3 ± 9.3 , в оз. Лача – $72.2 \pm 17.7 \text{ мкг/г с.о.}$ сопоставимо со средними арифметическими значениями (в оз. Воже – 36.6 ± 5.5 , оз. Лача – $71.9 \pm 5.7 \text{ мкг/г с.о.}$). Эти данные подтверждают сходство соотношения грунтов в анализируемой выборке и природной структуре ДО озер.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования, полученные на крупных мелководных озерах Воже и Лача, интересны из-за своеобразных характеристик этих во-

Таблица 2. Пигментные характеристики разнотипных грунтов в озерах Воже и Лача. Съемка 2015 г.

Тип грунта	Хл + Ф, мкг/г с.о.		Хл, % Хл + Ф		E ₄₈₀ /E ₆₆₅	
	среднее ± ошибка	C _v , %	среднее ± ошибка	C _v , %	среднее ± ошибка	C _v , %
1	<u>8.0</u> –	–	<u>71.7</u> –	–	<u>1.16</u> –	–
2	<u>9.3 ± 1.9</u>	59	<u>54.1 ± 8.6</u>	45	<u>1.38 ± 0.13</u>	<u>26</u>
	13.5 ± 2.6	39	73.8 ± 2.4	7	1.19 ± 0.06	9
3	<u>11.8 ± 1.7</u>	53	<u>63.2 ± 4.2</u>	24	<u>1.57 ± 0.12</u>	<u>27</u>
	27.6 ± 6.9	66	60.4 ± 7.4	32	1.56 ± 0.23	39
4	<u>8.1 ± 0.8</u>	24	<u>51.6 ± 11.1</u>	53	<u>1.73 ± 0.30</u>	<u>43</u>
	34.6 ± 10.7	87	38.1 ± 5.8	43	2.73 ± 0.33	34
5	<u>23.0 ± 8.2</u>	95	<u>51.8 ± 12.0</u>	62	<u>1.76 ± 0.31</u>	<u>47</u>
	54.5 ± 4.4	8	15.3 ± 4.1	27	3.15 ± 0.00	0.1
6	<u>4.2 ± 1.9</u>	104	<u>31.2 ± 13.3</u>	95	<u>2.94 ± 1.01</u>	<u>77</u>
	0.2	–	32.8	–	0.7	–
7	<u>65.0 ± 17.9</u>	87	<u>19.5 ± 3.6</u>	59	<u>2.76 ± 0.19</u>	<u>21</u>
	55.6 ± 12.8	52	18.3 ± 3.1	38	3.03 ± 0.24	18
8	<u>70.6 ± 9.7</u>	46	<u>16.0 ± 4.8</u>	99	<u>2.52 ± 0.15</u>	<u>20</u>
	99.6 ± 5.8	31	20.7 ± 1.6	40	2.99 ± 0.10	18
9	<u>67.4 ± 20.1</u>	52	<u>18.6 ± 2.5</u>	23	<u>2.20 ± 0.17</u>	<u>13</u>
	69.1 ± 29.4	60	26.2 ± 8.9	48	2.60 ± 0.27	15
10	<u>107.7 ± 68.0</u>	109	<u>26.4 ± 10.5</u>	69	<u>2.02 ± 0.11</u>	<u>10</u>
	137.3 ± 15.7	26	31.7 ± 5.1	36	2.26 ± 0.17	17

Примечания. Тип грунта как в табл. 1.

доемов. Сходные черты озер – ровное столообразное дно, небольшие глубины, значительные площади акватории, обилие зарослей, мощные слои илистых отложений, преобладание ветровых течений. Основное различие – тип осадкообразования (преобладание переноса взвеси с элементами переотложения в первом озере и седиментации во втором).

Полученные нами результаты согласуются с основными принципами экологической геохимии и биогеохимии, которые изучают природные объекты на атомно-молекулярном уровне (Савенко, 2003, 2011; Янин, 2003). Выявленные в работе закономерности пространственного распределения индикаторов продукционных свойств отложений – растительных пигментов (в частности, Хл + Ф) и ОВ – практически совпадают с таковыми у химических элементов. Среди геохимических закономерностей выделяют следующие: (1) повсеместное распространение химических элементов; (2) зональность их распределения и гетерогенность; (3) непрерывная миграция химических элементов во времени и пространстве, осуществляемая в биосфере при участии живого вещества; (4) физико-химическое единство живого вещества и окружающей среды и др. (Янин, 2003). Подобные закономерности для растительных пигментов были выявлены и ранее на других водоемах (малых реках, озерах, водохранилищах,

морских заливах и лагунах), расположенных в разных климатических зонах. Своеобразие результатов состоит в различиях количественных параметров в зависимости от условий абиотической среды и функционирования биоты (Номоконова, 2009, 2011; Сигарева, 2012; Смольская и др., 2018; Сигарева и др., 2019; Timofeeva et al., 2018). Универсальность закономерностей в распределении растительных пигментов в ДО – это основа для использования пигментных характеристик при оценке состояния водных экосистем. Наиболее общие представления об индикаторной роли растительных пигментов сводятся к следующему.

Растительные пигменты, прежде всего Хл, относятся к продукционным показателям, которые используются для расчетов первичной продукции растительных сообществ, оценки трофического состояния и эвтрофирования водоема, а также качества воды (Szymczak-Żyła, Kowalewska, 2009; Freiberg et al., 2011; Cotovicz et al., 2018; Koomklang et al., 2018). Применение Хл основано на роли этого пигмента как обязательного компонента фотосинтетического аппарата, создающего новообразованное ОВ – источник энергии для функционирования всей экосистемы. Тесные корреляционные связи Хл с интенсивностью фотосинтеза и биомассой растительных организмов, а также с концентрацией биогенных элементов и

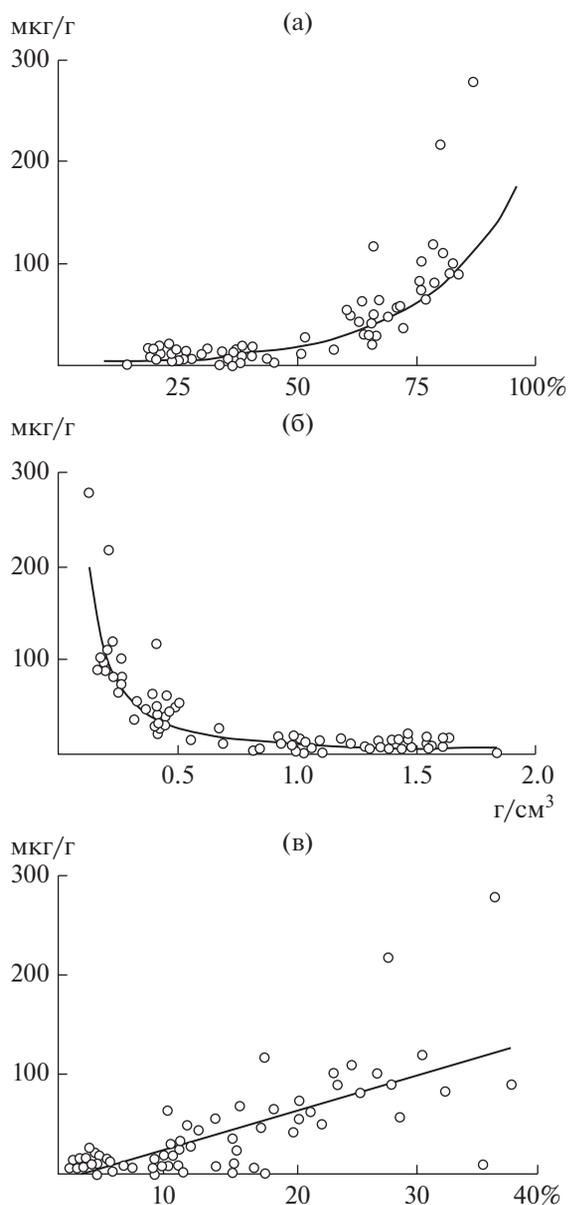


Рис. 4. Связи содержания осадочных пигментов (Хл + Ф, мкг/г сухого осадка) с влажностью (а), объемной массой (б) и содержанием органического вещества (в) в донных отложениях оз. Воже в 2015 г. Уравнения регрессии: $y = 1.62\exp(0.05x)$, $R^2 = 0.60$ (а); $y = 9.61x^{-1.48}$, $R^2 = 0.62$ (б); $y = 3.53x - 6.27$, $R^2 = 0.52$ (в).

прозрачностью воды стали основой количественной оценки продукционных характеристик планктона. Особый интерес представляют данные о содержании растительных пигментов в ДО, но изученность этих показателей гораздо меньше, чем в водной толще.

Между пигментными показателями верхнего и нижнего ярусов экосистемы найдены определенные соотношения. Синтезированные в функционирующих растительных организмах пигменты поступают в ДО после седиментации, миграции и

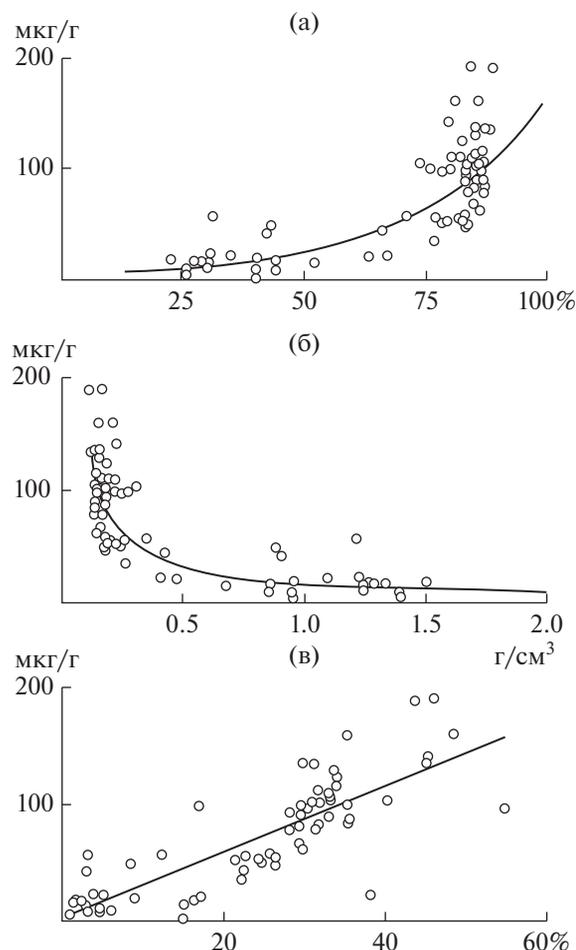


Рис. 5. Связи содержания осадочных пигментов (Хл + Ф) с влажностью (а), объемной массой (б) и содержанием органического вещества (в) в донных отложениях оз. Лача в 2015 г. Уравнения регрессии: $y = 3.67\exp(0.04x)$, $R^2 = 0.66$ (а); $y = 15.46x^{-1.01}$, $R^2 = 0.67$ (б); $y = 2.82x + 2.84$, $R^2 = 0.67$.

трансформации ОВ (Сигарева, 2012; Szymczak-Żuła, Kowalewska, 2009; Reuss et al., 2010; Tse et al., 2015). При этом исходные формы пигментов (например, Хл) обычно сохраняются в незначительных количествах, и в основном обнаруживаются деградированные, более устойчивые формы (феопигменты) (Leavitt, 1993). Фонд растительных пигментов в отложениях мелководных водоемов формируется из всех источников новообразованного ОВ — планктонных и бентосных сообществ (фитопланктона, микрофитобентоса, перифитона и макрофитов). Учитывая, что эвфотическая зона занимает всю водную толщу мелководных озер, а высшая водная растительность распространяется на значительную площадь (до 70% площади оз. Лача), можно было бы ожидать высокие концентрации растительных пигментов и ОВ в поверхностных ДО. Однако, в среднегодовом слое ДО накапливается небольшое количество пигментов, которое в пересчете на органический

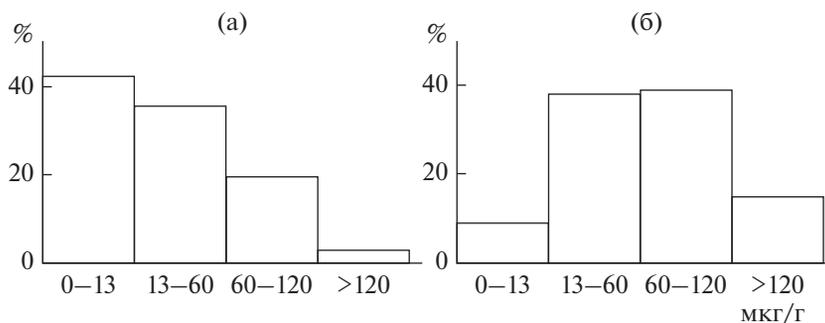


Рис. 6. Гистограмма распределения концентраций хлорофилла с феопигментами в донных отложениях озер Воже (а) и Лача (б) по категориям трофии: 0–13 – олиготрофная, 13–60 – мезотрофная, 60–120 – эвтрофная, >120 мкг/г с.о. – гипертрофная.

углерод составляет незначительную долю от годовой первичной продукции, как и в других водоемах. Ориентировочный расчет показал, что для мелководных озер Воже и Лача этот коэффициент составляет 0.38 и 0.46% соответственно. При этом органический углерод, накопившийся в ДО за год, составляет 6.3–7.7% годовой первичной продукции озерной экосистемы. Следовательно, большая часть первичной продукции утилизируется в водной толще, и только меньшая ее часть поступает в отложения в трансформированном виде. Это подтверждается значительным вкладом Φ – продуктов деградации Хл в ДО. В то же время органический углерод растений, рассчитанный исходя из содержания осадочных пигментов (Хл + Φ) и соотношения С/Хл для водорослей, принятого за 100 (Behrenfeld et al., 2005), составляет 5.3–6.5% общего органического углерода в отложениях. В разных типах ДО оз. Воже этот показатель изменялся от 2.6 до 8.5%, оз. Лача – от 3.8 до 16.9%. Полученные данные свидетельствуют о более сильных преобразованиях ОВ на начальном этапе диагенеза (литогенеза) в оз. Воже по сравнению с оз. Лача.

Растительные пигменты в современных ДО распространены повсеместно среди всех типов грунтов озер Воже и Лача (табл. 1, 2). Содержание пигментов в однотипных грунтах озер достоверно не различается, отражая более или менее сходные физико-географические условия (табл. 2). Однако, по уровню величин содержание растительных пигментов в исследуемых северо-западных озерах заметно меньше, чем в озерах центральной (более теплой) части РФ (Сигарева, 2012). Неоднородность распределения пигментов отражает дифференциацию вещества осадков на крупнозернистые и мелкодисперсные частицы, образующиеся под влиянием физико-химических условий среды. Гетерогенность в распределении растительных пигментов в поверхностных отложениях мелководных озер может быть также связана с окислительно-восстановительными условиями. Непрерывная миграция пигментов в составе ОВ из водной толщи в ДО осуществляется при непосредственном

участии живых организмов, например, зоопланктона и рыб, а также при оседании клеток фитопланктона. При интенсивной ветровой активности возрастает поток ОВ и пигментов из ДО в воду, что может приводить к дополнительной деградации Хл. Зависимости между содержанием пигментов и типологическими свойствами грунтов (рис. 4, 5) дают основание считать, что характер распределения растительных пигментов в ДО обусловлен тесной связью живого вещества с окружающей средой.

Изучение горизонтального (пространственно) распределения осадочных пигментов показало, что в целом оз. Лача характеризуется более высокими средними концентрациями, чем оз. Воже. Этот факт согласуется с данными о превышении первичной продукции растительных сообществ оз. Лача по сравнению с оз. Воже. Наиболее значительные различия связаны с развитием макрофитов, площадь зарастания которых в оз. Лача составляет в последнее время 70% акватории водоема.

Можно полагать, что причина выявленных различий состоит в особенностях литогенеза и, следовательно, осадкообразования в озерах. Наиболее мощный фактор формирования структуры грунтового комплекса в озерах Воже и Лача – ветровая активность, которая может рассматриваться как фактор, сдерживающий эвтрофирование. Именно из-за высокой скорости ветра в оз. Воже ДО формируются преимущественно за счет переноса взвеси и трансседиментации, что способствует усилению разнообразия отложений и мозаичности в распределении грунтов разного типа (рис. 2). В итоге, средние показатели продукционных характеристик бентали в оз. Воже оказались меньше, чем в оз. Лача из-за уменьшения доли площадей наиболее продуктивных илистых отложений в первом водоеме.

Мелководные озера теоретически должны накапливать гораздо больше органического углерода в ДО, чем другие водные объекты из-за того, что в них вся водная толща находится в эвфотической зоне, а интенсивность новообразования ОВ превышает скорость деструкции. Однако, наблю-

дения показали, что в ДО мелководных водоемов, как и прибрежных мелководных участков, сохраняется меньше растительных пигментов, чем в глубоких центральных зонах (Сигарева и др., 2000; Сигарева, 2012). Исключение составляют районы с макрофитным илом, где содержание Хл + Ф в ОВ может приближаться к таковому в функционирующих растениях (Сигарева, Тимофеева, 2004; Номоконова, 2009, 2011). Такие закономерности распределения пигментов характерны для пресноводных водоемов независимо от климата, например, умеренного в центральной России (оз. Плещеево, водохранилища Верхней Волги) или тропического муссонного во Вьетнаме (реки, пруды, карьеры, водохранилища, озера) (Сигарева, 2012; Timofeeva et al., 2018).

Содержание осадочных пигментов в поверхностном горизонте отложений в мелководном объекте уменьшается по мере возрастания относительного вклада площади песчаных грунтов и возрастания общей площади водоема, а также в зависимости от географического места расположения. Так, максимальные концентрации Хл + Ф (до 7365 мкг/г с.о. в черном битумоидном иле) были определены в искусственных водоемах и бессточных озерах площадью не более 0.3 га на территории Самарской Луки (Номоконова, 2009, 2011). В мелководном гипертрофном озере Неро (Ярославская обл.) площадью 57.8 км² концентрация пигментов составляла 300 мкг/г с.о. в преобладающем типе грунта – сапропеле (Состояние..., 2008). В оз. Лача площадью 345 км² содержание пигментов составляло 71.9 мкг/г с.о. при доминировании оливкового ила, в оз. Воже площадью 418 км² – 36.6 мкг/г с.о. при сходстве площадей песчаных и илистых грунтов.

Особенность фонда осадочных пигментов в исследованных мелководных озерах – относительно низкое содержание продуктов разрушения Хл в верхнем 5-см слое (около 60%) за счет контакта с эвфотической зоной водной толщи. Причина деградации пигментов в условиях проникновения солнечной радиации до дна – значительная толщина исследуемого слоя грунта, превышающая границы фотосинтеза в толще отложений (1–3 мм) (Taylor, Palmer, 1963), а также взмучивание отложений, усиливающее окисление в водной толще за счет кислорода.

По среднему содержанию Хл + Ф в ДО оз. Воже относится к типично мезотрофным водоемам, а оз. Лача – к эвтрофным. При этом озера считаются мезотрофными по фитопланктону, зоопланктону, макрозообентосу (Гидробиология..., 1978; Катанская, Летанская, 1986; Китаев, 2007; Ивичева, Филоненко, Корнева и др., 2021; Пряничникова, 2021). Есть сведения о слабозвтрофном состоянии оз. Лача по состоянию рыбного населения (Болотова и др., 1996), а также об эвтрофном состоянии оз. Воже по зоопланктону

(Лазарева, Сабитова, 2021). Озеро Воже по содержанию ОВ в ДО попадает в разряд олиготрофных, оз. Лача – эвтрофных водоемов, согласно работе (Белкина, 2011). Можно предположить, что причины различий трофического состояния озера Воже и Лача заключаются в интенсивности формирования первичной продукции ОВ растительными сообществами (Гидробиология..., 1978). Оценка трофического статуса озера Воже и Лача позволяет сделать вывод о благополучном состоянии их экосистем. Однако появляющиеся признаки эвтрофирования служат обоснованием дальнейшего мониторинга экологического состояния таких водоемов.

Признаки эвтрофирования озера Воже и Лача – увеличение площадей зарастания, увеличение концентрации ОВ в ДО, уменьшение разнообразия рыбного населения (Катанская, Летанская, 1986; Болотова и др., 1996; Распопов, 2005; Ивичева, Филоненко, 2015; Филоненко, Комарова, 2015). В то же время озера находятся на территории, удаленной от промышленности и сельского хозяйства, и характеризуются отсутствием загрязнения тяжелыми металлами и биогенными элементами (Гапеева и др., 2018). Полученные материалы соответствуют классическим представлениям о естественном эвтрофировании (Россолимо, 1977; Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990; Даценко, 2007). Однако, есть мнение, что эвтрофирование чистых северных озера зависит от поступлений биогенных элементов из атмосферы за счет трансграничного переноса (Болотова и др., 1996).

Уникальные особенности расположения, конфигурации, морфометрии дна, гидродинамики и продуктивности обуславливают значимость исследованных озера Воже и Лача как модельных водоемов для изучения цикла углерода в связи с глобальными климатическими флуктуациями. Изучение осадочных растительных пигментов как маркеров органического углерода и новообразованного ОВ может быть востребовано при рассмотрении раннего диагенеза, а также при оценке экологического состояния и анализе эволюции водных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучали показатели содержания и деградации Хл и ОВ на этапе раннего диагенеза в верхнем слое ДО крупных мелководных озера. Установлено, что все исследуемые показатели свидетельствуют о сильной трансформации ОВ в ДО. Показано, что осадочный Хл деградирован в среднем на 60%, что превышает такой показатель у клеток водорослей, но не достигает величин, характерных для глубоководных отложений. Органический углерод растений составляет незначительную часть (5–6%) от общего органического углерода в отложениях и 0.4–0.5% от первичной продукции ОВ. Общее органическое вещество в

ДО достигает 6–8% от первичной продукции ОВ озерных экосистем.

Пространственная неоднородность продукционных свойств бентосных биотопов в мелководных озерах с ровным столообразным дном обусловлена различиями процессов осадконакопления: в оз. Воже — доминированием переноса взвеси над седиментацией, в оз. Лача — седиментации над переносом. Трансседиментация, обусловленная гидродинамикой за счет ветровой активности, способствует усилению гетерогенности в формировании и распределении ДО и уменьшению абсолютных значений биотических характеристик — концентраций растительных пигментов и ОВ. Повышенные величины продукционных показателей бентали свойственны оз. Лача, в грунтовой комплексе которого по площади преобладают мелкодисперсные отложения. Среди грунтов наиболее продуктивны макрофитный и оливковый ил. Содержание растительных пигментов и ОВ в отложениях крупных мелководных озер, как и глубоководных водоемов, коррелирует с типологическими характеристиками грунтового комплекса. Наиболее часто отмечаемые концентрации Хл + Ф в отложениях оз. Воже относятся к олиготрофной и мезотрофной категориям, в оз. Лача — мезотрофной и эвтрофной. Согласно средним концентрациям осадочных пигментов бенталь оз. Воже характеризуется величинами мезотрофного уровня, оз. Лача — эвтрофного.

Основные геохимические закономерности, применимые к распределению растительных пигментов и ОВ: повсеместное распространение в грунтах разного типа; гетерогенность распределения с приуроченностью низких концентраций к песчаным грунтам, высоких — к илистым; связь осадочных пигментов с биотическими процессами; тесные корреляционные связи между пигментными и типологическими характеристиками отложений, отражающие единство живого вещества и окружающей среды.

Результаты работы дополнили представления о биогеохимических особенностях ДО в крупных мелководных зарастающих озерах, удаленных от объектов промышленного и сельскохозяйственного производства. Материалы, полученные на сравнительно чистых мелководных озерах Северо-Запада России, показали, что при сходстве уровня трофии по показателям развития планктона и бентоса трофические показатели бентосных биотопов характеризуются широким диапазоном величин — от олиготрофных до гипертрофных. Одинаковые типы ДО исследованных озер достоверно не различаются по пигментным и типологическим показателям грунтов, но в целом характеризуются пониженными удельными концентрациями Хл + Ф в ОВ по сравнению с другими водоемами, расположенными в условиях умеренного и тропического климата. Несмотря на

отсутствие явного антропогенного загрязнения в озерах были выявлены признаки эвтрофирования. Причиной эвтрофирования чистых озер может быть трансграничный перенос биогенных элементов и поступление их в водоем с площади водосбора, а также потепление климата.

Пигментные характеристики ДО могут быть использованы для изучения преобразования биосферы и устойчивого развития окружающей среды.

Работа выполнена по государственному заданию № 121051100099-5 и № 121051100104-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башкин В.Н., Евстафьева Е.В., Снакин В.В. и др. (1993) *Биогеохимические основы экологического нормирования*. М.: Наука, 304 с.
- Белкина Н.А. (2011) Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах. *Тр. Карельского науч. центра РАН*. (4), 35–41.
- Болотова Н.Л., Зуянова О.В., Зуянов Е.А., Терещенко В.Г. (1996) Изменение рыбной части сообщества и уловов при эвтрофировании крупного северного озера. *Вопросы ихтиологии*. 36(4), 470–480.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. (1965) *Донные отложения верхневолжских водохранилищ*. Л.: Наука, 159 с.
- Ветров А.А., Романкевич Е.А. (2001) Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в Арктических морях, ответ на современное потепление. *Океанология*. 51(2), 266–277.
- Гапеева М.В., Законнов В.В., Ложкина Р.А., Павлов Д.Ф., Борисов М.Я. (2018) Оценка загрязнения тяжелыми металлами малонаселенных территорий на примере Северо-Западного региона России. *Экология человека*. (3), 4–9.
- Гидробиология озер Воже и Лача (В связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг)*. (1978) Л.: Наука, 276 с.
- Гидрология озер Воже и Лача (В связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги)*. (1979) Л.: Наука, 288 с.
- Даценко Ю.С. (2007) *Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты*. М.: ГЕОС, 252 с.
- Ивичева К.Н., Филоненко И.В. (2015) Зообентос озера Воже. *Известия Самарского науч. центра РАН*. 17(4), 705–711.
- Катанская В.М., Летанская Г.И. (1986) Современное состояние автотрофных сообществ оз. Лача. *Водные ресурсы*. (5), 147–153.
- Китаев С.П. (2007) *Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов*. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 394 с.
- Корнева Л.Г., Митропольская И.В., Макаренко Н.Н., Цветков А.И. (2021) Структура и динамика фитопланктона больших мелководных зарастающих озер (Воже и Лача, Вологодская и Архангельская области, Россия). *Труды ИБВВ РАН*. 94(97), 17–29.
- Лазарева В.И., Сабитова Р.З. (2021) Ранне-летний зоопланктон озер Воже и Лача (Вологодская область). *Труды ИБВВ РАН*. 94(97), 56–76.
- Новоселов А.П., Студёнов И.И., Козьмин А.К., Дворянкин Г.А., Иммант Е.Н., Левицкий А.Л. (2017) Видо-

- вое разнообразие и динамика показателей кормовой базы рыб оз. Лача. Часть 1. Зоопланктон. *Arctic Environ. Res.* **17**(2), 113-122.
- Номоконова В.И. (2009) Гидрохимический режим и трофическое состояние озер Самарской Луки и сопредельной территории. *Известия Самарского научного центра РАН.* **11**(1), 155-164.
- Номоконова В.И. (2011) Содержание фотосинтетических пигментов в воде и донных отложениях водоемов Самарской Луки. *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии.* **20**(2), 54-70.
- Отчет о выполнении научно-исследовательской работы на тему: Исследование состояния и разработка научно обоснованных рекомендаций по восстановлению уровня режима водной системы оз. Воже – р. Свидь – оз. Лача.* Борок, 2015. 236 с.
- Пряничникова Е.Г. (2021) Макробентос озер Воже и Лача. *Труды ИБВВ РАН.* **94**(97), 77-93.
- Распопов И.М. (2005) Зарастание озера Лача макрофитами. *Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий: Тр. междунар. конф.* СПб: Наука, ВВМ, 186-192.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И. (2009) Органическое вещество Мирового океана. *Геология и геофизика.* **50**(4), 401-411.
- Росолимо Л.Л. (1977) *Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора.* М.: Наука, 144 с.
- Румянцев В.А., Кудерский Л.А., Алхименко А.П., Измайлова А.В. (2005). Континентальные водоемы Северного сегмента территории России: ресурсы, геоэкология. *Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий: Тр. междунар. конф.* СПб: Наука, ВВМ, 11-25.
- Савенко В.С. (2003) Геохимические аспекты теории биотической регуляции. *Известия РАН. Серия географическая.* (1), 20-32.
- Савенко В.С. (2011) Экология в геохимии. *Вестник Московского университета. Серия. 4. Геология.* (3), 15-22.
- Сигарева Л.Е. (2012) Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.; Т-во науч. изд. КМК, 217 с.
- Сигарева Л.Е., Законнов В.В., Шарапова Н.А. (2000) Оценка экологического состояния оз. Плещеево по пигментным характеристикам донных отложений. *Проблемы региональной экологии.* (6), 100-113.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. (2004) Содержание растительных пигментов в литоральных отложениях Рыбинского водохранилища в разные по водности годы. *Биология внутренних вод.* (1), 25-35.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В., Русанов А.Г., Игнатъева Н.В., Поздняков Ш.Р. (2019) Признаки естественного эвтрофирования мелководного озера Неро по осадочным пигментам. *Биология внутренних вод.* (4, вып. 2), 27-35.
- Смольская О.С., Жукова А.А., Люля А.С. (2018) Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мястро. *Журн. БГУ. Биология.* (2), 65-77.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI в.* (2008) М.: Наука, 406 с.
- Филоненко И.В., Комарова А.С. (2015) Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже. *Принципы экологии.* **4**(16), 63-72.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. (1990) *Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования.* Л.: Гидрометеиздат, 279 с.
- Янин Е.П. (2003) Экологическая геохимия и проблемы биогенной миграции химических элементов 3-го рода. *Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. (Труды Биогеохимической лаборатории. Т. 24).* М.: Наука. С. 5-9.
- Behrenfeld M.J., Boss E., Siegel D.A., Shea D.M. (2005) Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Glob. Biogeochem. Cycles* **19**, GB1006.
- Cotovicz L.C. Jr., Knoppers B.A., Brandini N., Poirier D., Costa Santos S.J., Cordeiro R.C., Abril G. (2018) Predominance of phytoplankton-derived dissolved and particulate organic carbon in a highly eutrophic tropical coastal embayment (Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil). *Biogeochemistry.* **137**(1-2), 1-14.
- Freiberg R., Nömm M., Tönno I., Alliksaar T., Nöges T., Kisand A. (2011) Dynamics of phytoplankton pigments in water and surface sediments of a large shallow lake. *Estonian J. Earth Sciences.* **60**(2), 91-101.
- Koomklang J., Yamaguchi H., Ichimi K., Tada K. (2018). A role for a superficial sediment layer in upward nutrient fluxes across the overlying water-sediment interface. *J. Oceanogr.* **74**(1), 13-21.
- Leavitt P.R. (1993) A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance. *J. Paleolimnol.* (9), 109-127.
- Lorenzen C.J. (1967) Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* **12**(2), 343-346.
- 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.* **143**, 327-329.
- Reuss N., Leavitt P.R., Hall R.I., Bigler C., Hammarlund D. (2010) Development and application of sedimentary pigments for assessing effects of climatic and environmental changes on subarctic lakes in northern Sweden. *J. Paleolimnol.* **43**(1), 149-169.
- Szymczak-Żyła M., Kowalewska G. (2009) Chloropigments *a* in sediments of the Gulf of Gdansk deposited during the last 4000 years as indicators of eutrophication and climate change. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **284**(3-4), 283-294.
- Taylor W.R., Palmer J.D. (1963) The relationship between light and photosynthesis in intertidal benthic diatoms. *Biol. Bull. mar. biol. Lab. Woods Hole.* **125**, 395.
- Timofeeva N.A., Sigareva L.E., Gusakov V.A., Zakonnov V.V. (2018) Content of plant pigments in the bottom sediments of the water bodies of Vietnam. *Inland Water Biology.* **11**(3), 278-285.
- Tse T.J., Doig L.E., Leavitt P.R., Quiñones-Rivera Z.J., Codling G., Lucas B.T., Liber K., Giesy J.P., Wheeler H., Jones P.D. (2015) Long-term spatial trends in sedimentary algal pigments in a narrow river-valley reservoir, Lake Diefenbaker, Canada *J. Great Lakes Res.* **41** (Suppl. 2), 56-66.