

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.555:581.132

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ В КЕРНАХ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ТРОФИИ
КРУПНЫХ МЕЛКОВОДНЫХ ОЗЕР ВОЖЕ И ЛАЧА
(СЕВЕРО-ЗАПАД РОССИИ)

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

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

*e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 29.07.2021 г.

После доработки 19.10.2021 г.

Принята к публикации 22.10.2021 г.

Получены первые данные по содержанию растительных пигментов в кернах крупных мелководных озер Воже и Лача, расположенных в верховьях р. Онега. В колонках отложений оливкового ила толщиной 1 м концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами изменялись в пределах 35–236 (94.2 ± 3.3) в оз. Воже и 58–119 (83.8 ± 1.3) мкг/г сухого осадка в оз. Лача. Степень разрушения хлорофилла в керне оз. Лача (98.7 ± 0.2%) превышала таковую в оз. Воже (85.2 ± 0.7%). При среднемноголетней скорости осадконакопления в оз. Воже 0.2 и оз. Лача 0.4 мм/год суммарная концентрация хлорофилла *a* с феопигментами достигает в первом озере 4.0, во втором – 6.2 мг/(м² год) за 2500-летний отрезок времени. В современный период среднегодовая скорость накопления пигментов почти одинакова для озер (5.6 и 5.3 мг/(м² год) соответственно). За весь рассматриваемый период прослеживались разнонаправленные тенденции накопления пигментов к настоящему времени: увеличение – в оз. Воже и уменьшение – в оз. Лача.

Ключевые слова: хлорофилл, феопигменты, вертикальное распределение, донные отложения, динамика трофии, озера Воже и Лача

DOI: 10.31857/S0320965222030159

ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху усиления антропогенного влияния и существенных климатических флуктуаций эвтрофирование пресных и морских вод остается глобальной проблемой (Smith, 2003; Maheux et al., 2016; Tsugeki et al., 2017; Deng et al., 2018a, 2018b; Huo et al., 2018; Yao et al., 2018; Zhao, Fu, 2019). Трофическое состояние разнотипных водных экосистем важно знать и прогнозировать как основу их структуры и функционирования. Экологическое состояние водных экосистем в значительной мере зависит от способности растительных сообществ создавать первичное ОВ за счет солнечной энергии (Винберг, 1960; Россолимо, 1977; Алимов, 2000; Deng et al., 2018a, 2018b). Интегральными показателями трофии считают растительные пигменты, концентрации которых отражают почти все этапы синтеза и трансформа-

ции ОВ – от первичной до конечной продукции (Swain, 1985; Leavitt, 1993; Сигарева, 2012). В гидроэкологии широко используются материалы о пространственно-временном распределении пигментов в ДО (Сигарева и др., 2021). По вертикальному профилю осадочных пигментов в кернах восстанавливают историю продуктивности водоема и, соответственно, динамику трофического состояния его экосистемы (Möller, Scharf, 1986; Szymczak-Żyła, Kowalewska, 2009; Tsugeki et al., 2017). Особые трудности возникают при изучении мелководных проточных экосистем, наиболее сильно подвергающихся воздействиям абиотических факторов, и в которых не выражено временное, послонное накопление ДО.

Озера Воже и Лача образуют систему проточных озер, соединенных р. Свидь (Гидрология..., 1979). Водоемы расположены в верховьях крупнейшей на северо-западе России р. Онега на территории Вологодской и Архангельской областей. Озера удалены от мест хозяйственной деятельности и используются для рекреации и спортивного рыболовства. Площадь оз. Воже – 418, оз. Лача – 345 км², средняя глубина – 1.4 и 1.6 м, нормаль-

Сокращения: ДО – донные отложения; ОВ – органическое вещество; Хл – хлорофилл *a*; Ф – феопигменты; E₄₈₀/E₆₆₅ – отношение оптических плотностей экстракта в максимумах поглощения каротиноидов (480 нм) и Хл *a* (665 нм); E_{665к} – оптическая плотность после подкисления экстракта; C_v – коэффициент вариации.

ный подпорный уровень – 122 и 118 м БС (Балтийской системы) соответственно. Водосборная территория образована отложениями ледникового происхождения. Заболоченность составляет 15%, залесенность – 77%, сельскохозяйственное освоение – ~8% площади водосбора. Коэффициент условного водообмена в оз. Воже – 3.5 год^{-1} , оз. Лача – 7.4 год^{-1} . Главный фактор гидродинамической активности – интенсивная скорость ветра, приводящая к изменению направления течений и влияющая на функционирование экосистемы озер. Скорость поверхностных течений в оз. Воже достигает 17 см/с , в оз. Лача – 13 см/с . С 1973 по 2015 гг. зарастаемость высшей водной растительностью оз. Воже возросла от 18.3 до 26%, оз. Лача от 45 до 70% (Гидробиология ..., 1978; Отчет..., 2015).

В оз. Воже преобладают процессы переноса взвеси, в оз. Лача – процессы седиментации. Основную площадь дна в оз. Воже занимают крупнозернистые наносы разного типа (60%), в оз. Лача – оливковые илы (88%) (Гидрология..., 1979; Законнов, Чуйко, 2019). Наибольшая мощность отложений в озерах отмечается в углублениях ложа – в ледниковой карстовой ложбине в южной части оз. Воже и серии карстовых воронок у юго-западных и северо-восточных берегов оз. Лача. Скорость илонакопления в оз. Воже $0.1\text{--}0.2$, оз. Лача – $0.2\text{--}0.4 \text{ мм/год}$.

Цель работы – на основе вертикального распределения растительных пигментов в кернах отложений выявить многолетние тренды продуктивности крупных мелководных проточных озер Воже и Лача (Северо-Запад России), характеризующихся ровным дном, интенсивным гидродинамическим режимом и высокой зарастаемостью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Керны толщиной 1 м отбирали в июле 2015 г. из карстовых воронок трубчатым штанговым дночерпателем Ф.Д. Мордухай-Болтовского на станциях с глубинами 4 м в оз. Воже ($60^{\circ}59'6.13'' \text{ с.ш.}, 39^{\circ}07'7.51'' \text{ в.д.}$) и 3 м в оз. Лача ($61^{\circ}32.8'6.09'' \text{ с.ш.}, 38^{\circ}7.38'18.3'' \text{ в.д.}$). Керны делили на односантиметровые слои. Концентрацию Хл и Ф определяли в сырых образцах спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Lambda 25 (Perkin Elmer, США) по (Lorenzen, 1967; Сигарева, 2012). Концентрацию пигментов рассчитывали в разных единицах: на сухой осадок (мкг/г), на площадь сырого грунта естественной влажности при толщине слоя 1 мм ($\text{мг}/(\text{м}^2 \text{ мм})$) и на ОВ донных осадков (мг/г ОВ). В качестве показателей отношения концентрации каротиноидов и Хл использовали индексы E_{480}/E_{665} и $E_{480}/1.7E_{665к}$. Естественную влажность определяли высушиванием

образцов при 60°C , содержание ОВ – по потере массы сухого грунта при прокаливании (600°C), сухую объемную массу – расчетным методом (Сигарева и др., 2019). Среднюю годовую скорость накопления пигментов рассчитывали для 50-летних периодов, исходя из содержания Хл + Ф в односантиметровых слоях сырого грунта оз. Воже и двухсантиметровых слоях оз. Лача и скорости осадконакопления в оз. Воже 0.2 , в оз. Лача 0.4 мм/год (Гидрология..., 1979).

Средние величины содержания растительных пигментов определяли для всей толщи кернов, а также верхних (0–10 см) и нижних (11–100 см) частей. Кроме того, рассчитывали коэффициенты вариации и коэффициенты детерминации содержания Хл + Ф с влажностью грунта, воздушно-сухой объемной массой и содержанием ОВ в сухом осадке. Достоверность различий оценивали по критерию Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Керн из оз. Воже представлен оливковым мелкоалевритовым илом, подстилаемым бело-голубой глиной на глубине 90–100 см, керн из оз. Лача – оливковым илом без маркирующего горизонта. При скорости илонакопления 0.2 в оз. Воже и 0.4 мм/год в оз. Лача ориентировочный возраст илов в кернах различается в ~2 раза – 4450 и 2500 лет соответственно. Возраст сантиметровых слоев в керне оз. Воже оценивается в ~50, оз. Лача – ~25 лет.

Верхние слои кернов (0–15 см) были сильно обводнены, нижележащие отложения характеризовались уплотненной консистенцией. Влажность ила в оз. Воже была в пределах 65.8–89.1%, воздушно-сухая объемная масса – $0.12\text{--}0.44 \text{ г/см}^3$, в оз. Лача – 76.1–88.0% и $0.13\text{--}0.28 \text{ г/см}^3$ соответственно. В нижней части керна оз. Воже в отложениях бело-голубой глины влажность понижалась до 37–46%, а объемная масса повышалась до $0.76\text{--}1.06 \text{ г/см}^3$. Средние значения водно-физических показателей оливкового ила в обоих озерах достоверно не различались (табл. 1).

Содержание Хл + Ф в керне оз. Воже изменялось от 35.1 до 236 (94.2 ± 3.3), в оз. Лача – от 58.3 до 119 (83.8 ± 1.3) мкг/г сухого осадка (рис. 1, 2). Коэффициент вариации концентраций Хл + Ф в керне оз. Воже заметно превышал таковой оз. Лача. Другие показатели содержания осадочных пигментов были сопоставимыми для обоих озер или незначительно выше в оз. Воже (табл. 1).

Вертикальный профиль содержания Хл + Ф, выраженного в разных единицах, в керне оз. Воже характеризуется увеличением показателя от нижних слоев к верхним (рис. 1), в оз. Лача – некоторым уменьшением (рис. 2). При этом, в обоих озерах динамика содержания ОВ четко не выражена, и различия не выявлены (рис. 1г, 2г). По вертикали керна вклад ОВ чаще всего характеризуется

Таблица 1. Содержание ОВ, пигментные и водно-физические характеристики всей толщи илов в кернах озер Воже и Лача (съемка в 2015 г.)

Показатель	оз. Воже		оз. Лача	
	$M \pm m$	$C_v, \%$	$M \pm m$	$C_v, \%$
ОВ, %	24.4 ± 0.3	13	29.5 ± 0.2	7
Хл + Ф, мкг/г сухого осадка	94.2 ± 3.3	33	83.8 ± 1.3	15
Хл + Ф, мг/г ОВ	0.38 ± 0.01	25	0.28 ± 0.0	14
Хл + Ф, мг/(м ² мм)	19.3 ± 0.4	19	15.4 ± 0.3	17
Хл, мкг/г сухого осадка	15.7 ± 1.7	104	1.0 ± 0.1	138
Хл, % от (Хл + Ф)	14.8 ± 0.7	45	1.3 ± 0.2	145
Ф, мкг/г сухого осадка	78.4 ± 1.9	22	82.8 ± 1.3	15
Ф, % от (Хл + Ф)	85.2 ± 0.7	7.9	98.7 ± 0.2	1.9
E_{480}/E_{665}	2.43 ± 0.04	17	3.62 ± 0.03	16
$E_{480}/1.7E_{665к}$	1.57 ± 0.03	16	2.15 ± 0.02	9
Влажность, %	81.2 ± 0.4	4.3	83.5 ± 0.1	1.4
Объемная масса, г/см ³	0.22 ± 0.01	22	0.18 ± 0.0	8.3

Примечание: M – среднее значение, m – ошибка среднего.

сходными величинами, но минимальное его содержание было в нижней части керна оз. Воже. Наиболее изменчива концентрация пигментов в верхних 10 см керна оз. Воже. Средние концентрации Хл + Ф, рассчитанные на сухой грунт, ОВ и на сырой грунт естественной влажности, для верхней (0–10 см) и нижней (11–100 см) частей кернов в оз. Воже превышали соответствующие значения в оз. Лача (табл. 2).

Степень деградации Хл характеризуется наиболее высокими значениями в оз. Лача, достигая 99.8% при минимальной вариабельности по вертикали ($C_v = 2\%$). В оз. Воже вклад феопигментов максимален в подстилающем слое (97.3%) с незначительным содержанием Хл + Ф (1.3 мкг/г сухого осадка). Показатели отношения каротиноидов к Хл в кернах исследованных озер соответствуют величинам, известным для других водоемов. В оз. Воже индекс E_{480}/E_{665} варьирует от 1.48 до 3.23. Значения индекса $E_{480}/1.7E_{665к}$, отражающие соотношение каротиноидов и Хл с учетом Ф, изменяются от 0.99 до 2.01. В оз. Лача первый индекс варьирует от 2.82 до 4.30, второй – от 1.13 до 2.54. Средние значения индексов в керне оз. Воже заметно меньше, чем в оз. Лача (табл. 1). Различия озер по степени деградации пигментов сохраняются при сравнении верхней и нижней частей кернов – в обеих частях керна оз. Воже относительное содержание феопигментов меньше, чем в оз. Лача (табл. 2).

Содержание Хл + Ф в керне оз. Воже соответствует типологическим показателям отложений: коэффициент детерминации (R^2) пигментов с влажностью – 0.67, с объемной массой – 0.72, с содержанием ОВ – 0.52. Однако в керне оз. Лача зависимость между пигментными и типологическими характеристиками не обнаружена, что подтверждается незначительной вариабельностью величин.

В оз. Воже отмечено наиболее интенсивное увеличение содержания Хл + Ф в расчете на сухой грунт за последние 500 лет (верхний 10-сантиметровый слой), а также 4 тыс. лет тому назад (нижний 20-сантиметровый слой) (рис. 1). В оз. Лача, напротив, динамика концентрации пигментов более хаотична с заметным общим трендом понижения концентраций Хл + Ф к настоящему времени от начала рассматриваемого периода (2.5 тыс. лет назад).

Скорость накопления пигментов (Хл + Ф) в среднегодовом слое отложений была неравномерной по вертикали – в оз. Воже в среднем 3.9 мг/(м² год), в оз. Лача – 6.2 мг/(м² год). Однако в верхних слоях толщиной 5 см средние годовые скорости накопления пигментов сопоставимы – в оз. Воже 5.6, в оз. Лача 5.3 мг/(м² год). В более глубоких слоях кернов годовая скорость

Таблица 2. Содержание ОВ и растительных пигментов в илах верхней и нижней частей кернов озер Воже и Лача (съемка 2015)

Показатель	оз. Воже	оз. Лача
ОВ, %	<u>27.0 ± 0.6</u> 24.1 ± 0.4	<u>27.2 ± 0.2</u> 29.7 ± 0.2
Хл + Ф, мкг/г сухого осадка	<u>156.6 ± 15.8</u> 86.3 ± 1.8	<u>80.0 ± 1.6</u> 84.2 ± 1.4
Хл + Ф, мг/г ОВ	<u>0.57 ± 0.05</u> 0.36 ± 0.01	<u>0.29 ± 0.01</u> 0.28 ± 0.00
Хл + Ф, мг/(м ² мм)	<u>25.6 ± 1.9</u> 18.5 ± 0.3	<u>13.1 ± 0.3</u> 15.6 ± 0.3
Ф, % (Хл + Ф)	<u>70.0 ± 3.1</u> 87.1 ± 0.3	<u>99.2 ± 0.2</u> 98.6 ± 0.2
E_{480}/E_{665}	<u>1.73 ± 0.04</u> 2.51 ± 0.04	<u>3.77 ± 0.04</u> 3.60 ± 0.04

Примечание. Над чертой – для слоя 0–10 см, под чертой – для 11–100 см.

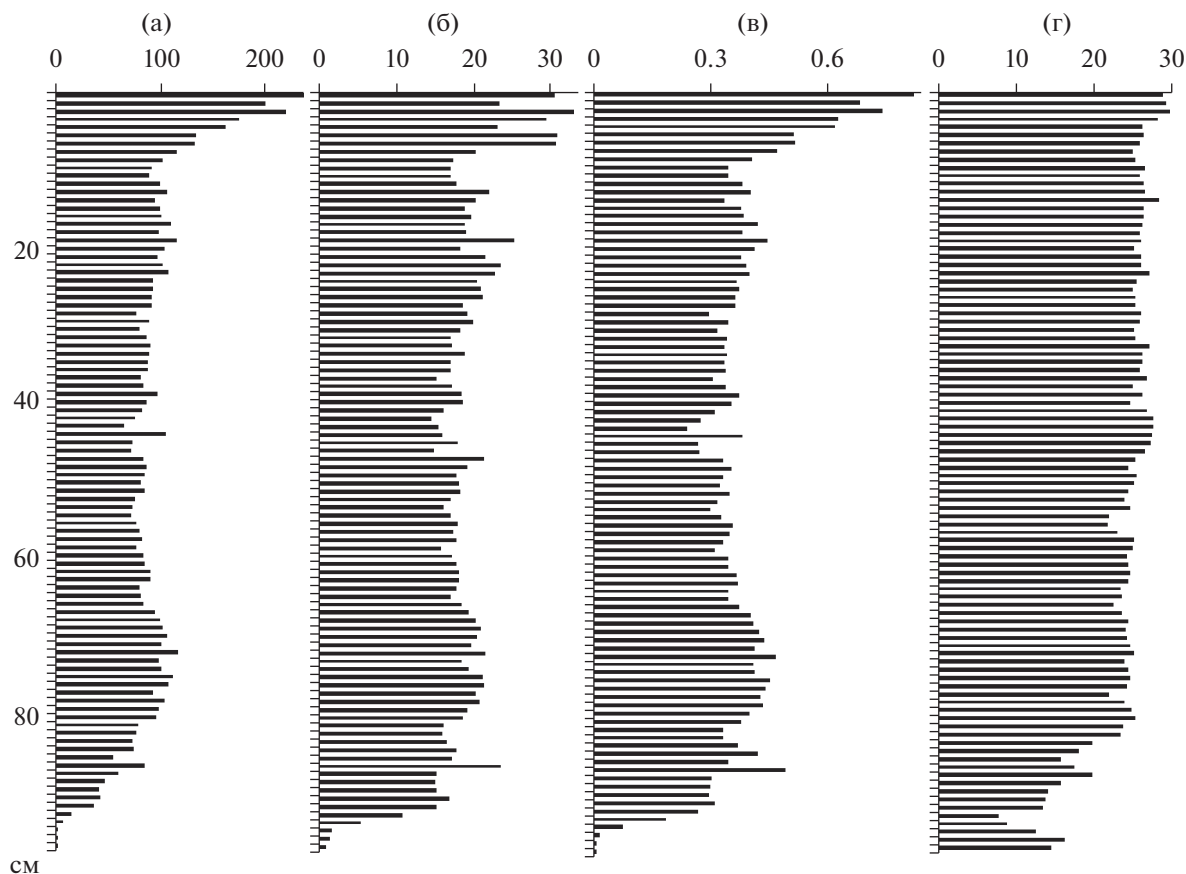


Рис. 1. Вертикальное распределение растительных пигментов и ОВ в керне отложений оз. Воже. Съемка 2015 г. По горизонтали: а – Хл + Ф, мкг/г сухого грунта; б – Хл + Ф, мг/(м² мм); в – Хл + Ф, мг/г ОВ; г – ОВ, % массы сухого грунта. По вертикали – длина керна, см.

накопления пигментов в оз. Лача заметно выше, чем в оз. Воже (рис. 3а). В целом, заметен тренд увеличения среднегодового содержания Хл + Ф к настоящему времени в оз. Воже и тренд уменьшения в оз. Лача. Между скоростями годового накопления пигментов в кернах озер Воже и Лача отмечен достоверный отрицательный коэффициент корреляции (-0.49), отражающий разную направленность изменений многолетней динамики продукционных процессов. Примечательно, что многолетняя динамика среднегодового накопления пигментов в сумме для озер характеризовалась повышенными величинами в последние годы (~ 350 лет), но общий тренд за весь рассматриваемый период не прослеживался (рис. 3б). Суммарная для двух озер скорость накопления пигментов в многолетнем аспекте варьирует незначительно от 8 до 12 мг/(м² год) ($C_v = 9.5\%$) по всей вертикали керна.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В изучении эвтрофирования водных экосистем приоритетное место занимают растительные пигменты, и, прежде всего, Хл, поскольку осново-

полагающий трофодинамический показатель – возрастание скорости первичной продукции ОВ за счет биогенных элементов – трудно оценить (Сигарева, 2012). Помимо базисных индикаторов эвтрофирования (элементы минерального питания, Хл, прозрачность), в настоящее время обращают внимание на факторы продуктивности, связанные с потеплением климата. Это, прежде всего, увеличение интенсивности ультрафиолетовой радиации и ослабление ветровой активности, а также динамика кислородного режима в водоеме, перемещение водных масс, биогенных элементов и взвеси (Мартынова, 2008; Maheux et al., 2016; Andersen et al., 2017; Deng et al., 2018a, 2018b). Обеднение кислородом придонного слоя воды и ДО приводит к увеличению растворимости фосфорных соединений и возрастанию внутренней биогенной нагрузки, стимулирующей эвтрофирование (Мартынова, 2008; Yang et al., 2020). Создавая первичное ОВ, экосистемы могут по-разному реагировать на абиотические условия (Россолимо, 1977; Алимов, 2000; Китаев, 2007).

Доказательством эвтрофирования в процессе эволюции экосистем считается уменьшение глубины водного объекта за счет накопления осад-

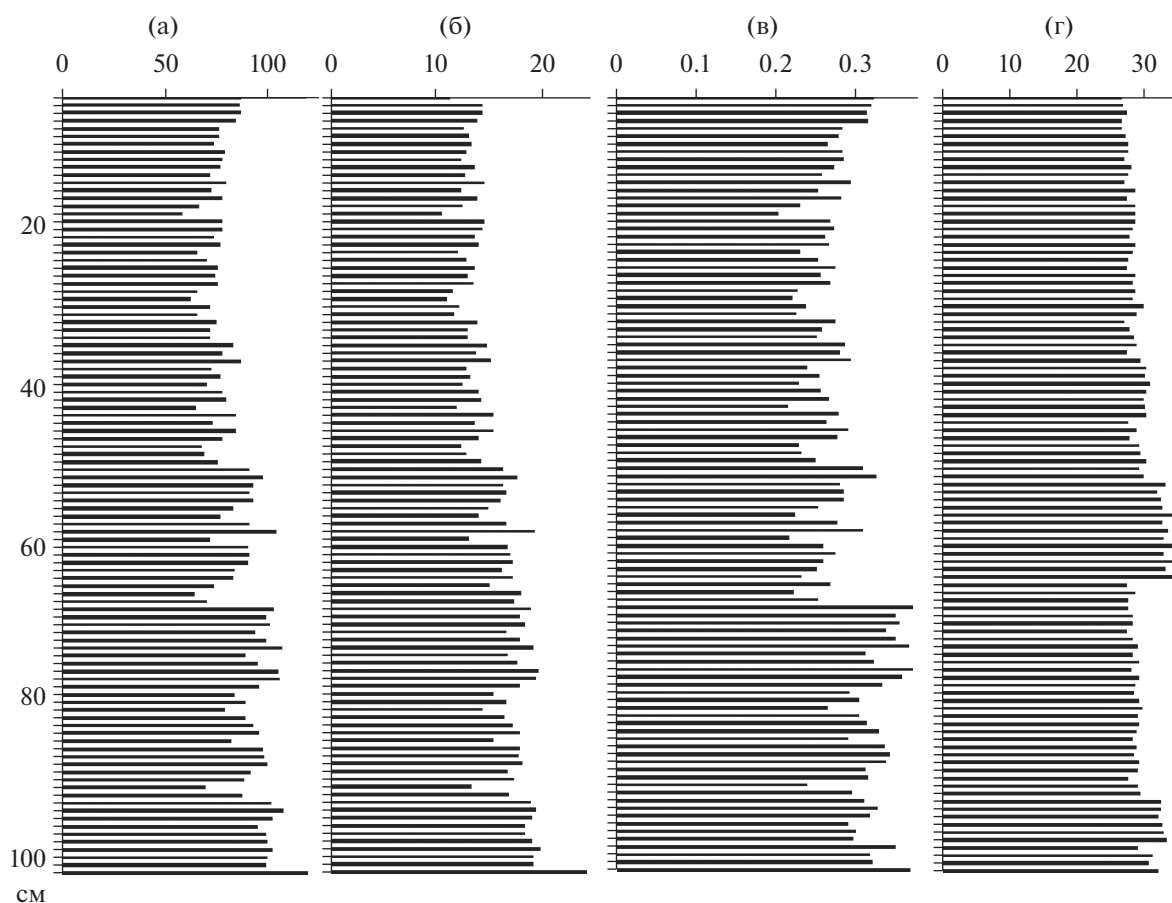


Рис. 2. Вертикальное распределение растительных пигментов и ОВ в керне отложений оз. Лача. Съемка 2015 г. По горизонтали: а – Хл + Ф, мкг/г сухого грунта; б – Хл + Ф, мг/(м² мм); в – Хл + Ф, мг/г ОВ; г – ОВ, % массы сухого грунта. По вертикали – длина керна, см.

ков (Даценко, 2007). Однако, в некоторых мелководных озерах интенсивная гидродинамическая активность препятствует седиментации взвеси и формированию межгодовой слоистости отложений, поэтому об эвтрофировании в таких экосистемах могут свидетельствовать среднесезонные тренды трофических показателей, относящихся к ряду лет. К таким водоемам относится оз. Воже. Ровное дно, интенсивная ветровая активность способствуют трансседиментации, преобладанию выноса взвеси над осадконакоплением. Признаки эвтрофирования этого озера отмечены в исследованиях рыбной части биотического сообщества (Болотова и др., 1996). В нашей работе эвтрофирование оз. Воже удалось выявить, изучая динамику растительных пигментов в единственной карстовой воронке. Вертикальное распределение Хл + Ф в керне характеризовалось наиболее быстрыми изменениями в последние 500 лет и в целом положительным трендом накопления пигментов за весь рассматриваемый период продолжительностью ~4.5 тыс. лет. Характер динамики пигментов в метровом керне оз. Воже согласуется с таковым в разнотипных водоемах, в которых исследуемая толщина колонок дости-

гала сходных величин. Анализ кернов в ряде водоемов (гипертрофное оз. Неро, мезотрофное оз. Плещеево, мезотрофное оз. Нарочь, мезотрофное Рыбинское водохранилище) показал, что вертикальное распределение растительных пигментов отражает повсеместное возрастание скорости эвтрофирования на современном этапе эволюции (Сигарева, 2012; Гусева, Иванов, 2018; Смольская, Жукова, 2019).

Совершенно иная картина отмечена для оз. Лача, в которое поступают воды оз. Воже через р. Свидь. Для оз. Лача характерно преобладание седиментации над выносом взвеси. Однако многолетняя динамика пигментов в керне не была типичной: в самой верхней части керна (≤ 5 см) выявлено лишь незначительное увеличение показателей содержания Хл + Ф, а для всего рассматриваемого периода (~2.5 тыс. лет) прослеживается тренд уменьшения концентраций к настоящему времени. Вертикальная изменчивость биотических показателей зависит от типа грунта (Сигарева, 2012; Yin et al., 2016), однако этот фактор не мог быть причиной различий трендов осадочных пигментов, поскольку в кернах озер оливковый ил был единственным типом грунта. Если рассматривать

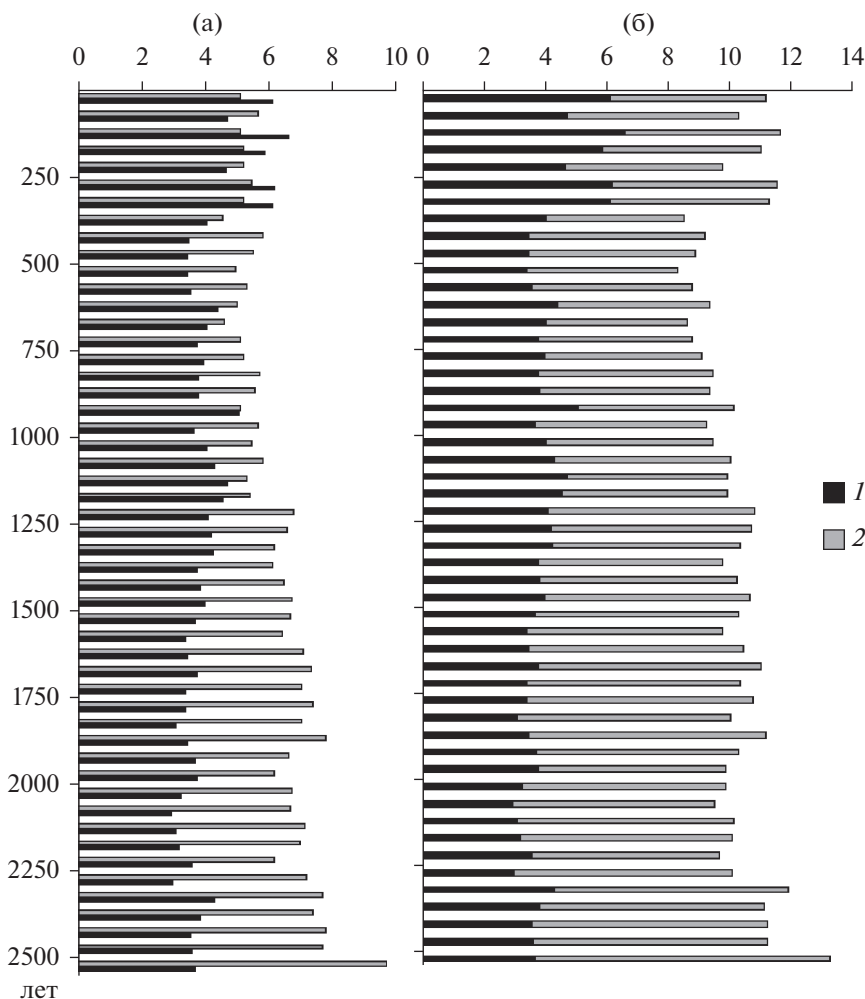


Рис. 3. Многолетняя динамика среднегодовой скорости накопления хлорофилла с феопигментами в кернах озер Воже и Лача за 2500 лет при скорости осадконакопления соответственно 0.2 и 0.4 мм/год. По горизонтали: а – скорость накопления пигментов Хл + Ф, мг/(м² год) в отдельных озерах, б – суммарная скорость накопления Хл + Ф, мг/(м² год) в озерах. По вертикали – количество лет тому назад 1 – оз. Воже, 2 – оз. Лача.

оз. Лача как часть единой водной системы с оз. Воже, то снижение концентрации пигментов в верхней части колонки в первом водоеме при увеличении этого показателя во втором можно считать итогом взаимодействия экосистем. Примечательно, что средние концентрации пигментов (в расчете на сухой грунт) в кернах с одинаковым типом грунта в обоих озерах были близкими между собой и относились к эвтрофной категории (Möller, Scharf, 1986). Однако по среднегодовой скорости накопления Хл + Ф в ДО уровень трофии оз. Лача выше, чем оз. Воже, на протяжении почти всего исследуемого периода. В последние столетия трофическое состояние озер стало сходным.

Анализ причин различий озер по характеру вертикального распределения растительных пигментов в кернах, а, следовательно, и по скорости эвтрофирования, может быть основан, прежде всего, на представлениях о роли водосбора в формировании продуктивности водоемов. Донные отложения – это не только продукт взаимодей-

ствия абиотических условий и биоты водоема, но и продукт влияния водосбора на водную экосистему (Воронцов, Спасская, 1984; Мартынова, 2007, 2008). Согласно работе (Гидрология..., 1979), площадь водосбора оз. Лача (12130 км²), как и водообмен (7.4 год⁻¹), почти в 2 раза больше, чем оз. Воже (5870 км² и 3.5 год⁻¹ соответственно), поэтому можно ожидать, что интенсивный водообмен способствует быстрой сменяемости вод в оз. Лача за счет большого количества притоков, создающих высокую внешнюю биогенную нагрузку. В то же время, усиленное зарастание оз. Лача макрофитами ограничивает гидродинамическую активность и создает условия для кислородной стратификации. По уровню концентрации пигментов в расчете на сухой грунт (~100 мкг/г) оба озера были сходными в течение длительного времени, и только в современный период концентрация пигментов в оз. Воже стала превосходить таковую в оз. Лача почти вдвое. Аналогично изме-

няется содержание пигментов в расчете на 1 м² и на ОВ. В то же время, оба озера характеризуются сходными годовыми скоростями накопления растительных пигментов в последние годы.

Антропогенные факторы, которые могли стать причиной масштабных изменений в экосистемах озер Воже и Лача на современном этапе эволюции – обогащение вод элементами минерального питания за счет вырубки леса, молевой сплав в XIX в., а также зарегулирование водного стока низконапорной плотиной на р. Свидь (Законнов, Чуйко, 2019). Полученные результаты дают основание полагать, что к настоящему времени продуктивность оз. Воже возросла, а оз. Лача снизилась.

Согласно предшествующим исследованиям, озера Воже и Лача различались по трофическому состоянию: оз. Воже оценивали как мезотрофное с признаками эвтрофирования по характеристикам структуры рыбного населения – снижению видового разнообразия, усилению доминирования короткоциклового вида (Болотова и др., 1996), оз. Лача – как слабоэвтрофное по состоянию развития фитопланктона и высшей водной растительности (Катанская, Летанская, 1986). По зообентосу (Гидробиология..., 1978; Ивичева, Филоненко, 2015) и зоопланктону (Новоселов и др., 2017) оз. Лача считали эвтрофным. Данные настоящей работы дают представление о динамике трофического состояния системы озер Воже–Лача.

Выводы. Выявлен характер многолетней динамики осадочных пигментов в двух крупных мелководных озерах, сообщающихся между собой и образующих единую водную систему. Несмотря на сходство озер по геоморфологическим показателям и расположение в одной климатической зоне, тенденции изменений всех показателей содержания растительных пигментов по вертикали кернов асинхронны. К настоящему времени прослеживается тренд увеличения концентрации Хл + Ф в оз. Воже и уменьшения в оз. Лача. При каскадном расположении изученных водоемов продуктивность верхнего оз. Воже по средней скорости накопления пигментов в керне меньше, чем ниже расположенного оз. Лача. Результаты углубляют представление об эвтрофировании северных озерных экосистем, не подвергающихся антропогенному загрязнению.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по темам государственных заданий (г/р № 121051100099-5 и № 121051100104-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алимов А.Ф. 2000. Элементы теории функционирования водных экосистем. Санкт-Петербург: Наука.
Болотова Н.Л., Зуянова О.В., Зуянов Е.А., Терещенко В.Г. 1996. Изменение рыбной части сообщества и уло-

вов при эвтрофировании крупного северного озера // Вопр. ихтиологии. Т. 36. № 4. С. 470.

Винберг Г.Г. 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.

Воронцов Н.К., Спаская И.С. 1984. Природные особенности водосборных бассейнов и морфометрия озер // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Ленинград: Наука. С. 5.

Гидробиология озер Воже и Лача (В связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг). 1978. Ленинград: Наука.

Гидрология озер Воже и Лача (в связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги). 1979. Ленинград: Наука.

Гусева О.А., Иванов А.А. 2018. Вертикальное распределение растительных пигментов в донных отложениях оз. Неро // Экология речных бассейнов: Труды IX Междунар. научно-практ. конф. Владимир: Владимир. гос. ун-т. им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. С. 573.

Даценко Ю.С. 2007. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. Москва: ГЕОС.

Законнов В.В., Чуйко Г.М. 2019. Проблемы крупных мелководных озер гумидной зоны Европейской территории России // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Междунар. конф. Часть I. Казань: Академия наук Татарстана. С. 76.

Ивичева К.Н., Филоненко И.В. 2015. Зообентос озера Воже // Изв. Самар. науч. центра РАН. Т. 17. № 4 (4). С. 705.

Катанская В.М., Летанская Г.И. 1986. Современное состояние автотрофных сообществ оз. Лача (по наблюдениям в разные по водности годы) // Вод. ресурсы. № 5. С. 147.

Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН.

Мартынова М.В. 2007. Связь морфометрических характеристик озер с химическим составом их донных отложений // Вод. ресурсы. Т. 34. № 4. С. 469.

Мартынова М.В. 2008. Влияние химического состава донных отложений на внутреннюю фосфорную нагрузку // Вод. ресурсы. Т. 35. № 3. С. 358.

Новоселов А.П., Студенов И.И., Козьмин А.К. и др. 2017. Видовое разнообразие и динамика показателей кормовой базы рыб оз. Лача. Часть 1. Зоопланктон // Arctic Environ. Res. Т. 17. № 2. С. 113.

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. 2015. Борок.

Россолимо Л.Л. 1977. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. Москва: Наука.

Сигарева Л.Е. 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.

Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. и др. 2019. Признаки естественного эвтрофирования мелководного озера Неро по осадочным пигментам // Биология внутр. вод. № 4. Вып. 2. С. 27. <https://doi.org/10.1134/S0320965219060147>

- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Ложкина Р.А. 2021. Современное трофическое состояние бентали Иваньковского и Угличского водохранилищ по осадочным пигментам // Биология внутр. вод. № 2. С. 151.
https://doi.org/10.31857/S0320965221020145
- Смольская О.С., Жукова А.А. 2019. Вертикальное распределение производных хлорофилла и пигментные индексы в донных отложениях оз. Нарочь // Пойменные и дельтовые биоценозы голарктики: биологическое многообразие, экология и эволюция: Матер. междунар. науч.-практ. конф. С. 152.
- Andersen M.R., Kragh T., Sand-Jensen K. 2017. Extreme diel dissolved oxygen and carbon cycles in shallow vegetated lakes // Proc. R. Soc. B. V. 284. № 1862. ID 20171427.
https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1427
- Deng J., Paerl H.W., Qin B. et al. 2018a. Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes // Sci. Total Environ. V. 645. P. 1361.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.208
- Deng J., Zhang W., Qin B. et al. 2018b. Effects of climatically-modulated changes in solar radiation and wind speed on spring phytoplankton community dynamics in Lake Taihu, China // PLoS One. 13(10):e0205260.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205260
- Huo S., Ma C., Xi B. et al. 2018. Development of methods for establishing nutrient criteria in lakes and reservoirs: A review // J. Environ. Sci. V. 67. P. 54.
https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.07.013
- Leavitt P.R. 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. V. 9. № 2. P. 109.
https://doi.org/10.1007/BF00677513
- Lorenzen C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations // Limnol., Oceanogr. V. 12. № 2. P. 343.
https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343
- Maheaux H., Leavitt P.R., Jackson L.J. 2016. Asynchronous onset of eutrophication among shallow prairie lakes of the Northern Great Plains, Alberta, Canada // Global Change Biol. V. 22. № 1. P. 271.
https://doi.org/10.1111/gcb.13076
- 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
- Smith V.H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 10. № 2. P. 126.
https://doi.org/10.1065/espr2002.12.142
- 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. V. 284. № 3–4. P. 283.
https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.10.007
- Swain E.B. 1985. Measurement and interpretation of sedimentary pigments // Freshwater Biol. V. 15. № 1. P. 53.
https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1985.tb00696.x
- Tsugeki N.K., Kuwae M., Tani Y. et al. 2017. Temporal variations in phytoplankton biomass over the past 150 years in the western Seto Inland Sea, Japan // J. Oceanogr. V. 73. № 3. P. 309.
https://doi.org/10.1007/s10872-016-0404-y
- Yang C., Pan Y., Geng J. et al. 2020. Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication // Environ. Pollut. V. 262: 114292.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114292
- Yao X., Zhang Y., Zhang L., Zhou Y. 2018. A bibliometric review of nitrogen research in eutrophic lakes and reservoirs // J. Environ. Sci. V. 66. P. 274.
https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.022
- Yin K., Zetsche E.M., Harrison P.J. 2016. Effects of sandy vs muddy sediments on the vertical distribution of microphytobenthos in intertidal flats of the Fraser River Estuary, Canada // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 23. № 14. P. 14196.
https://doi.org/10.1007/s11356-016-6571-y
- Zhao J., Fu G. 2019. Assessment of lake eutrophication recovery: the filtering trajectory method (FTM) and its application to Dianchi Lake, China // Environ. Monit. Assess. V. 191. № 6. P. 360.
https://doi.org/10.1007/s10661-019-7492-2

Plant Pigments in Cores as Indicators of Trophy in Large Shallow Lakes Vozhe and Lacha (Russia)

L. E. Sigareva¹, *, N. A. Timofeeva¹, and V. V. Zakonnov¹

¹Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia

*e-mail: sigareva@ibiw.ru

The first data on the content of plant pigments in cores of large shallow Lakes Vozhe and Lacha located in the upper reaches of the Onega River are given. In silts of olive color of 1m length, the total concentration of chlorophyll *a* and pheopigments varied within 35–236 (94.2 ± 3.3) in Lake Vozhe and 58–118 (83.8 ± 1.3) µg/g dry sediment in Lake Lacha. The degree of chlorophyll destruction in core of Lake Lacha (98.7 ± 0.2%) was higher than in Lake Vozhe (85.2 ± 0.7%). With an average long-term sedimentation rate of 0.2 and 0.4 mm/year in Lakes Vozhe and Lacha, the total concentrations of chlorophyll *a* and pheopigments are 4.0 and 6.2 mg/(m² year) over 2500 years, respectively. In the recent period, the average annual rate of pigment accumulation was almost the same in the lakes (5.6 and 5.3 mg/(m² year)). Over the period under consideration, the different patterns of long-term dynamics of pigment accumulation in the studied lakes were found: to the present time a positive trend in Lake Vozhe and a negative trend in Lake Lacha were revealed.

Keywords: chlorophyll, pheopigments, vertical distribution, bottom sediments, trophy dynamics, Lakes Vozhe and Lacha