

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.555.6:581.132

СОДЕРЖАНИЕ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НЕБОЛЬШОГО РУСЛОВОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2023 г. Л. Е. Сigareва^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 25.11.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 17.05.2023 г.

Представлены первые данные о концентрациях растительных пигментов в донных отложениях уникального по гидрологическому режиму Уводьского водохранилища (бассейн р. Волга, Россия), которые поддерживают гипотезу о более интенсивном накоплении углерода в небольших водоемах. Установлено, что среднее на станциях содержание хлорофилла *a* и продуктов его трансформации достигает 62.6 ± 10.0 мкг/г сухого грунта, 35.2 ± 4.5 мг/(м² · мм) сырого грунта, 0.73 ± 0.09 мг/г органического вещества отложений. Соотношение органического углерода с концентрацией пигментов варьирует в пределах 400–6000 в зависимости от типа грунта, что существенно превышает величины, известные для макрофитов и фитопланктона. Несмотря на особенности гидродинамики и геоморфологии водохранилища, пространственное распределение осадочных пигментов согласуется со структурой грунтового комплекса, что типично для разнотипных водоемов. Отмечено уменьшение различий между концентрациями пигментов в песчаных и илистых биотопах Уводьского водохранилища по сравнению с Верхней Волгой. Средняя концентрация хлорофилла *a* с феопигментами (58.5 ± 6.7 мкг/г сухого грунта), рассчитанная с учетом площадей грунтов разного типа, в Уводьском водохранилище в 2.3 раза больше, чем в крупном Горьковском водохранилище, из которого вода поступает через канал Волга–Уводь. Трофическое состояние водохранилища по концентрации осадочных пигментов – мезотрофное. Признаки эвтрофирования в Уводьском водохранилище выражены более четко, чем в Горьковском.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, феопигменты, трофическое состояние, донные отложения, Уводьское водохранилище

DOI: 10.31857/S032096522306030X, **EDN:** LVEGKO

ВВЕДЕНИЕ

Растительные пигменты широко исследуются как показатели функционирования растительных организмов, сообществ и экосистем (Винберг, 1960; Swain, 1985; Phillips et al., 2008; Тищенко и др., 2020). В гидробиологических работах первостепенное значение отводится пространственно-временному распределению пигментов в пелагиали и бентали водоемов (Структура..., 2018; Moir et al., 2018). Информация о содержании растительных пигментов в ДО необходима для восстановления продукционных показателей водоемов и оценки их трофического состояния (Makri et al., 2019; Bernát et al., 2020; Gushulak et al., 2021), а также для изучения влияния изменений климата на водные экосистемы (Rühland et al., 2015; Garnier et al., 2019; Hofmann et al., 2021; Rahaman et al., 2022).

Индикаторное значение осадочных пигментов для понимания структурно-функциональной организации разнотипных экосистем основано, прежде всего, на знаниях особенностей взаимодействия водных масс и ДО при различном гидродинамическом режиме (Алимов, 2000; Cabecinha et al., 2009; Krol et al., 2011; Cardoso-Silva et al., 2022; Wu et al., 2022). Наименее изучены растительные пигменты в ДО техногенных водоемов, среди которых преобладают небольшие и малые водохранилища – источники питьевого водоснабжения (Авакян и др., 1987; Румянцев и др., 2021).

Уводьское водохранилище – памятник природы, используется для снабжения водой населения Ивановской обл. Гидрологические особенности этого водохранилища обусловлены в значительной мере влиянием водных масс, нерегулярно поступающих из крупного Горьковского водохранилища через канал Волга–Уводь (Законнов и др., 2000; Маркевич, Елизарова, 2000). Ранее расти-

Сокращения: ДО – донные отложения; Хл – хлорофилл *a*; Ф – феопигменты; ОВ – органическое вещество; C_v – коэффициент вариации; с.о. – сухой осадок.

тельные пигменты в ДО Уводьского водохранилища не изучали.

Цель работы — выявить содержание и характер распределения осадочных пигментов и установить трофический статус небольшого Уводьского водохранилища с неоднородным гидрологическим режимом в плесах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы ДО отбирали в 2012 г. с помощью гравитационной грунтовой трубки ГОИН-1 из верхнего 5-сантиметрового слоя на станциях, расположенных в шести плесах водохранилища: Колбаскинском (ст. 20), Ивановском (ст. 10–15), Уводьском (ст. 18, 19), Центральном (ст. 7–9), Красоткинском (ст. 16, 17) и Приплотинном (ст. 1–3, 5) (рис. 1). Пигменты извлекали ацетоном из проб с натуральной влажностью и определяли в общем экстракте спектрофотометрическим методом с помощью спектрофотометра Lambda 25 (Perkin Elmer, США). Концентрации Хл и Ф рассчитывали по уравнениям (Lorenzen, 1967). О соотношении каротиноидов и Хл судили по отношению оптических плотностей в максимумах спектра поглощения соответствующих пигментов до подкисления экстрактов (индекс E_{480}/E_{665}) и после (индекс $E_{480}/1.7E_{665к}$). Второй показатель учитывает наличие Ф и поэтому отражает значения индекса, на который не влияют продукты разрушения Хл. Рассчитанный индекс $E_{480}/1.7E_{665к}$ можно более корректно сравнивать с величинами, известными для планктонных водорослей с незначительной долей разрушения Хл. Тип ДО оценивали по классификации (Буторин и др., 1975), учитывающей гранулометрический состав, естественную влажность, сухую объемную массу и концентрацию ОВ. Органическое вещество определяли по потере при прокаливании (600°C), пигменты — как в ряде работ (Сигарева и др., 2004, 2013, 2022; Тимофеева и др., 2021).

Содержание Хл в планктоне Уводьского водохранилища рассчитывали, исходя из концентрации Хл + Ф в среднегодовом слое осадконакопления и средней глубины. Основанием для расчета послужила выявленная на волжских водохранилищах закономерность: среднее для водоема содержание Хл в водной толще близко к содержанию Хл + Ф в среднегодовом слое осадконакопления (Сигарева и др., 2013). Трофическое состояние водохранилища по Хл + Ф в ДО оценивали по (Möller, Scharf, 1986): олиготрофное — <13 , мезотрофное — $13–60$, эвтрофное — $60–120$, гипертрофное — >120 мкг/г с.о.

Статистические расчеты выполняли с помощью программ MS Excel и Statistica 8.0. Изменчивость показателей оценивали по коэффициенту вариации C_v . Для оценки связи между показателя-

ми использовали регрессионный анализ. Достоверность различий средних значений оценивали по t -критерию Стьюдента ($p < 0.05$).

Краткая характеристика Уводьского водохранилища. Уводьское водохранилище ($57^{\circ}07'00''$ с.ш., $40^{\circ}51'00''$ в.д.) создано в 1937–1939 гг. на р. Увось — притоке р. Клязьма, относящейся к бассейну р. Оки. Водохранилище снабжает крупный индустриально-текстильный г. Иваново с населением >400 тыс. человек питьевой водой на 80%.¹ Водохранилище вытянуто с севера на юг и по форме повторяет затопленные русла рек Увось, Колбаска и Красотка с крутыми размываемыми берегами и многочисленными заливами по ручьям и оврагам. По геоморфологии Уводьский и Приплотинный плесы с невыраженной литоралью и обрывистыми берегами напоминают микроканьоны с глубинами до 11–18 м. Красоткинский и Центральный плесы характеризуются выровненностью ложа, пологостью береговых склонов и развитой литоралью. В зависимости от водности года площадь зеркала водохранилища варьирует от 10.4 до 17.3 км². Полный объем 0.0685 км³ при НПУ 119.6 м Балтийской системы. Длина водохранилища 19 км, средняя ширина 0.72 км, максимальная глубина 18.6 м, средняя глубина 6 м, протяженность береговой линии 92.6 км. Площадь мелководий с глубинами ≤ 2 м — 2.9 км². Прозрачность воды по диску Секки — ~ 1.5 м. Заросли высшей водной растительности занимают 10.1% площади акватории, доминируют гидрофиты (Папченков, Маркевич, 2003). Наиболее сильно зарастает Колбаскинский плес. Водохранилище соединено каналом длиной 78 км с р. Волгой. Волжские воды поступают в канал из Горьковского водохранилища ниже г. Плес. Гидрологический режим неоднороден из-за периодических колебаний стока воды в р. Увось и нерегулярного функционирования канала (Законнов и др., 2000). При отсутствии поступления воды из Горьковского водохранилища проточность в Колбаскинском и Красоткинском плесах нулевая, в Уводьском, Центральном и Приплотинном плесах — 7.23, 2.38, 1.96 год⁻¹ соответственно. При поступлении волжской воды через канал проточность Красоткинского плеса возрастает до 20.3, Приплотинного — до 5.5 год⁻¹. Для водохранилища характерно интенсивное переотложение (трансседиментация) аллювия в русловой и литоральной зонах. Темпы осадконакопления в Уводьском водохранилище (пределы 1.4–4.6, среднее 2.6 мм/год) близки к таковым в крупных верхневолжских водохранилищах (2.1–2.9 мм/год) (Законнов, 2007). По площади дна преобладают илы (50%), доля песков — 30%, отложений из макрофитов — 10, размывших и

¹ Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Ивановской области в 2012 г. 2013. Иваново.

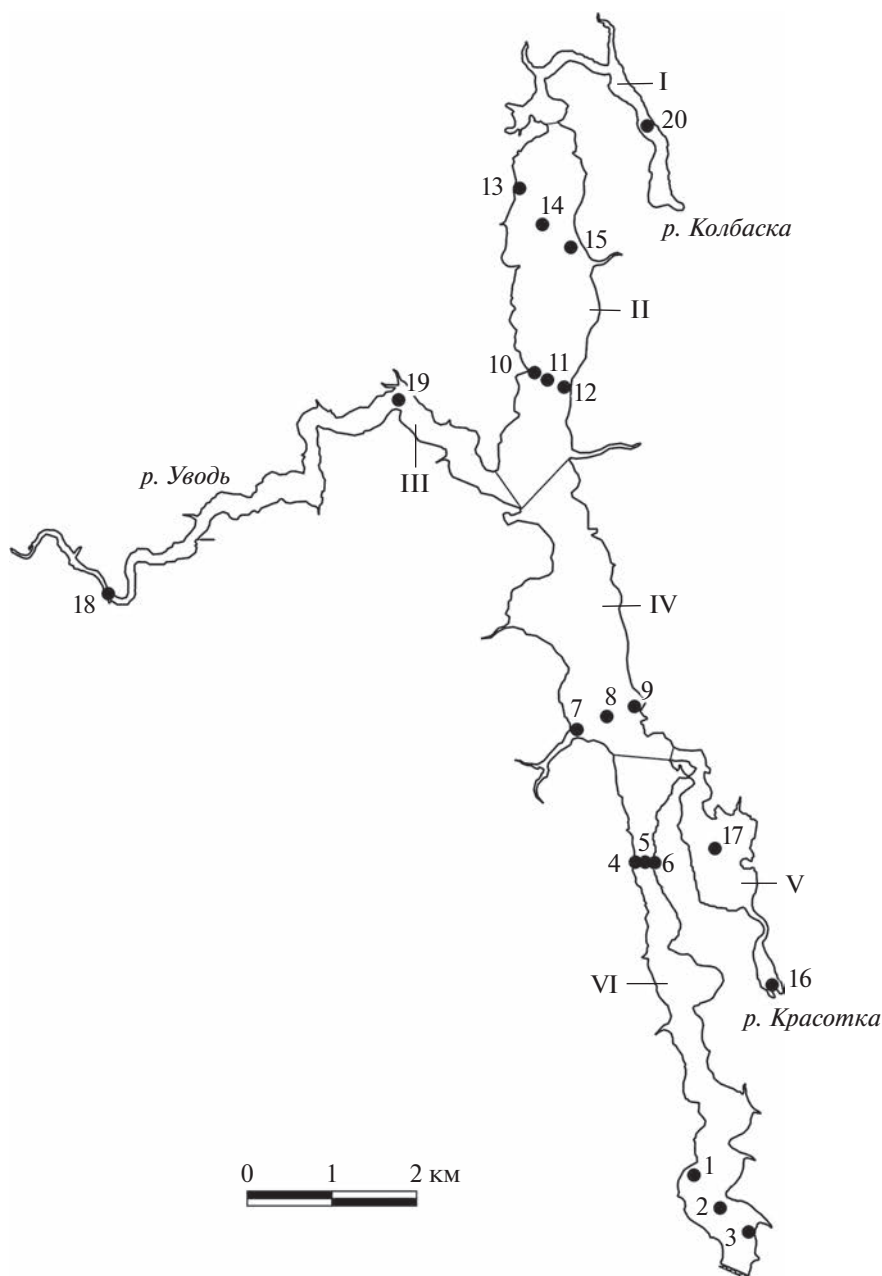


Рис. 1. Схема расположения стандартных станций (1–20) в Уводьском водохранилище. Плесы: I – Колбаскинский, II – Ивановский, III – Уводьский, IV – Центральный, V – Красоткинский, VI – Приплотинный.

трансформированных почв – 10 (Законнов и др., 2000). Водохранилище подвергается антропогенному загрязнению тяжелыми металлами (Долотов и др., 2010).

Климат в Ивановской обл. умеренно континентальный с холодной многоснежной зимой и умеренно жарким коротким летом. В год наблюдений (2012) почти все сезоны характеризовались более высокой (по сравнению с нормой) температурой и повышенным количеством осадков с ча-

стыми ливнями и шквалами, а также усилением ветровой активности до 20 м/сум.²

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Донные отложения были представлены в основном илами с преобладанием песчанистых (табл. 1). Водно-физические свойства ДО соот-

² Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Ивановской области в 2012 г. 2013. Иваново.

Таблица 1. Характеристики донных отложений на станциях Уводьского водохранилища в 2012 г.

№ станции	Глубина, м	Влажность, %	Объемная масса сухая, г/см ³	ОВ, %	Хл + Ф			Ф, %	E ₄₈₀ /E ₆₆₅	E ₄₈₀ /1.7E _{665к}	Тип грунта
					мкг/г с.о.	мг/(м ² мм)	мг/г ОВ				
Колбаскинский плес											
20	1.8	58.5	0.56	9.4	99.9	56.3	1.06	89.6	1.34	0.85	Песчанистый ил
Иваньковский плес											
10	4.5	41.4	0.93	4.0	41.3	38.4	1.03	88.3	1.63	1.04	Песчанистый ил
11	6.5	66.8	0.42	15.4	159.1	66.8	1.03	86.1	1.74	1.12	Глинистый ил
12	6.5	36.9	1.05	3.3	22.6	23.7	0.69	100	2.26	1.33	Илистый песок
13	2.8	41.3	0.93	4.0	12.3	11.5	0.31	81.2	1.29	0.86	Илистый песок
14	6.0	81.0	0.22	47.3	89.9	19.4	0.19	91.1	1.88	1.18	Торфянистый ил
15	3.0	81.0	0.22	47.3	103.1	22.3	0.22	91.2	1.83	1.15	Торфянистый ил
Уводьский плес											
18	2.0	13.3	1.92	1.2	1.0	1.9	0.08	100	4.79	2.82	Крупный песок
19	7.5	57.9	0.57	9.1	107.4	61.7	1.18	93.6	1.99	1.22	Песчанистый ил
Центральный плес											
7	7.0	55.3	0.62	7.9	58.6	36.5	0.74	85.7	1.70	1.10	Песчанистый ил*
8	10.0	42.0	0.92	4.1	47.0	43.0	1.14	87.1	1.78	1.14	Песчанистый ил
9	4.5	31.8	1.20	2.6	29.0	34.8	1.11	86.8	2.28	1.46	Илистый песок
Красоткинский плес											
16	2.0	25.2	1.42	2.0	2.5	3.5	0.12	73.4	1.02	0.71	Глина
17	4.0	53.3	0.66	7.1	40.5	26.8	0.57	89.9	2.02	1.27	Песчанистый ил
Приплотинный плес											
1	12.5	55.5	0.62	8.0	75.2	46.5	0.94	92.8	1.85	1.14	Песчанистый ил**
2	11.0	56.8	0.59	8.6	90.3	53.7	1.05	91.8	1.79	1.11	Песчанистый ил
3	3.0	59.3	0.55	9.8	85.3	46.8	0.87	89.9	1.59	1.00	Глинистый ил
5	11.5	54.0	0.65	7.4	62.7	40.7	0.85	92.9	1.41	0.87	Песчанистый ил

Примечание. * — с остатками макрофитов; ** — с раковинами дрейссены.

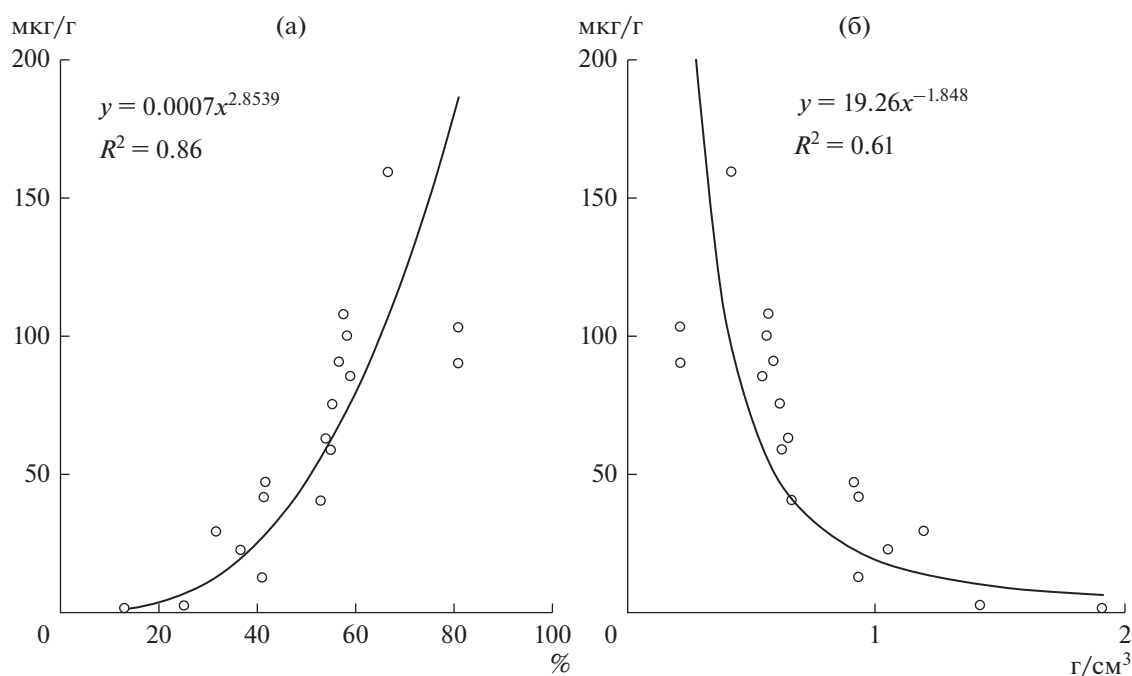


Рис. 2. Связи содержания растительных пигментов с влажностью (а) и сухой объемной массой грунта (б). По оси абсцисс: а — влажность, б — сухая объемная масса; по оси ординат — Хл + Ф, мкг/г с.о.

ветствовали их типам и характеризовались небольшой влажностью и высокой объемной массой (табл. 1). Исключением были образцы торфянистого ила, которому свойственны повышенная влажность, небольшая объемная масса и высокое содержание ОВ. Вклад ОВ в образцах грунта изменялся от 1.2 до 47.3% сухой массы.

Хлорофилл в отложениях был деградирован на всех участках (табл. 1), на продукты его разрушения (Ф) приходилось 73–100% (среднее $89.5 \pm 1.4\%$) суммы с неразрушенным Хл при небольшой вариабельности $C_v = 6.8\%$). Содержание Хл + Ф изменялось в широких пределах (1–159 мкг/г с.о.), среднее — 62.6 ± 10.0 мкг/г с.о. ($C_v = 62\%$). Распределение концентраций пигментов по площади дна водохранилища неравномерное (табл. 1). Низкие концентрации Хл + Ф отмечены в отложениях песка на речном участке Увдовского плеса (ст. 18), а также в неглубоком Красоткинском плесе (ст. 16), в котором наиболее сильно увеличивалась проточность при работе канала Волга–Увody. Высокие значения содержания Хл + Ф приурочены к глинистым и торфянистым илам. В наиболее глубоком Приплотинном плесе все исследованные станции характеризовались повышенным содержанием осадочных пигментов. Наиболее сильно различаются средние концентрации Хл + Ф в ДО Красоткинского (21.5 мкг/г с.о.) и Приплотинного (78.4 мкг/г с.о.) плесов из-за различий в водообмене. Концентрации Хл + Ф в расчете на единицу площади дна и ОВ распре-

ляются аналогично пигментам в сухой массе грунта (табл. 1). Среднее для водохранилища содержание растительных пигментов Хл + Ф в песке и илистом песке 16.2 ± 6.1 мкг/г с.о., 18.0 ± 7.2 мг/(м² · мм), 0.55 ± 0.22 мг/г ОВ, в песчанистом и глинистом илах — 78.8 ± 10.6 , 47.0 ± 3.5 , 0.95 ± 0.06 соответственно. В целом пески достоверно отличаются от илов по содержанию Хл + Ф в сухом осадке ($p < 0.05$, t -критерий 5.1). Содержание Хл + Ф в слое отложений натуральной влажности с учетом площадей разнотипных грунтов достигает 33.6 мг/(м² · мм).

Содержание Хл + Ф в отложениях связано с характеристиками грунта — влажностью ($R^2 = 0.86$) и сухой объемной массой ($R^2 = 0.61$) — нелинейной зависимостью: положительной в первом случае и отрицательной во втором (рис. 2). Тесная связь прослеживается также между концентрациями пигментов и ОВ для всего массива данных ($R^2 = 0.61$). Исключение образцов торфянистого ила, обогащенного трудноминерализуемой органикой, приводит к увеличению силы связи ($R^2 = 0.91$).

Соотношение каротиноидов и Хл — индекс E_{480}/E_{665} , используемый обычно для оценки функционального состояния растительных организмов и сообществ, изменялся от 1.34 до 4.79 (табл. 1). В песках этот индекс (2.66 ± 0.75) характеризовался более высокими величинами, чем в илах (1.71 ± 0.06), вероятно, из-за более быстрой деградации Хл на аэрируемых песчаных участках

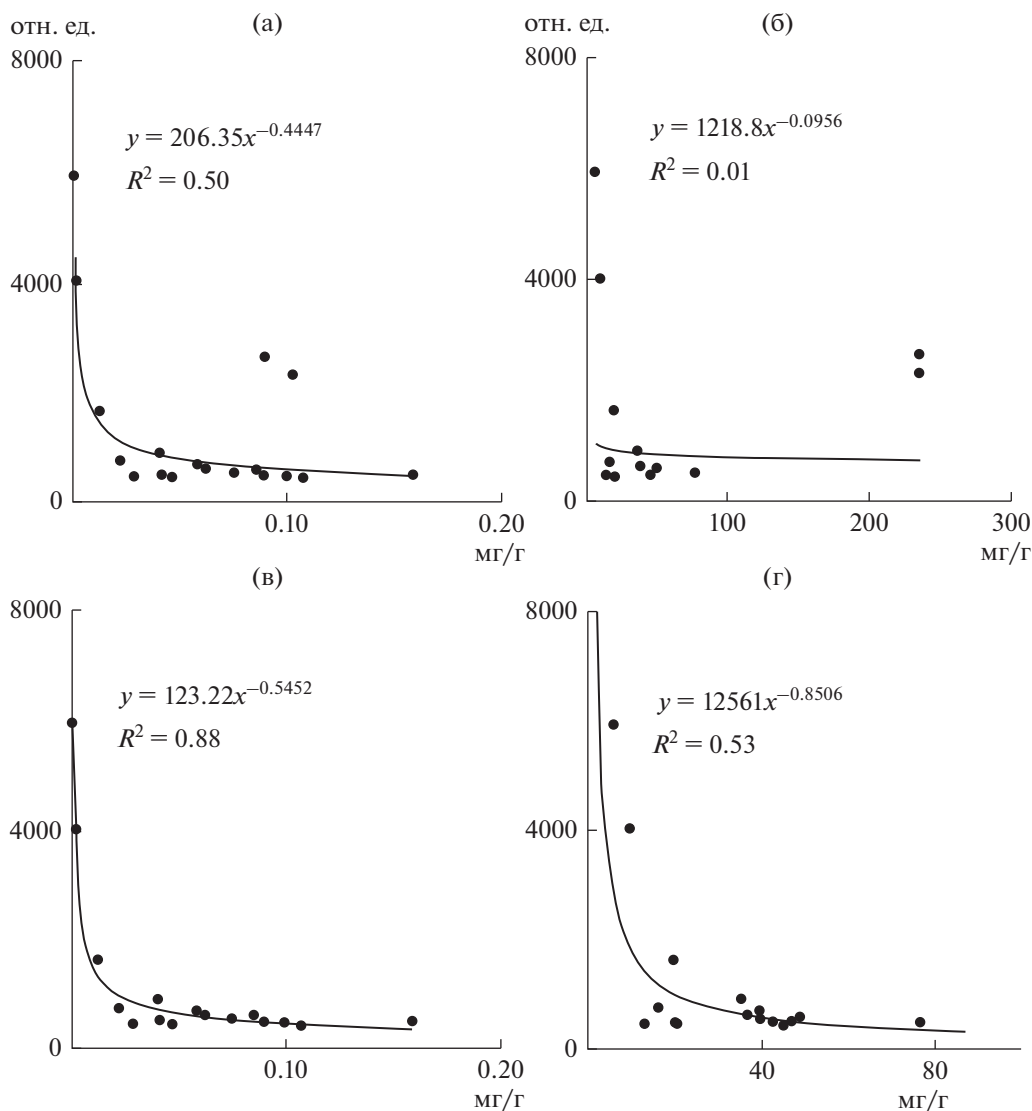


Рис. 3. Связи $C/(Xл + \Phi)$ с содержанием пигментов и органического углерода в Увдовском водохранилище. По оси ординат – отношение $C/(Xл + \Phi)$; по оси абсцисс: а – $Xл + \Phi$, мг/г с.о., для всех проб, б – $ОВ$, мг/г с.о., для всех проб, в – $Xл + \Phi$, мг/г с.о., без торфянистого ила, г – $ОВ$, мг/г с.о., без торфянистого ила.

(табл. 1). Индекс $E_{480}/1.7E_{665к}$, учитывающий влияние Φ на отношение каротиноидов и $Xл$, варьировал от 0.71 до 2.82. Средние значения индекса $E_{480}/1.7E_{665к}$ (1.19 ± 0.11) в ДО достоверно меньше ($p < 0.05$, t -критерий 3.2), чем исходный индекс E_{480}/E_{665} (1.90 ± 0.19), и ближе к таковым в растительных сообществах. Например, в фитопланктоне волжских водохранилищ индекс E_{480}/E_{664} (аналог E_{480}/E_{665}) достигает лишь 0.8–1.3 (Минеева, 2004).

В продукционных работах по фитопланктону (Behrenfeld et al., 2005) и на культурах водорослей (Ковалева, Финенко, 2019) изучены соотношения концентраций органического углерода и $Xл$. Оценка значений этого показателя в ДО дополняет представления о причинах его изменчивости в

экосистемах. В Увдовском водохранилище отношение $C/(Xл + \Phi)$ в песчаном и глинистом илах варьировало в пределах 400–900, в торфянистом иле – 2300–2600, в глине и крупном песке – 4000–5900, среднее для всех образцов – 1300 ± 400 . В целом $C/(Xл + \Phi)$ зависит не только от степени разрушения $Xл$, но и от концентрации органического углерода и типа грунта (рис. 3).

Восстановление концентрации $Xл$ фитопланктона в Увдовском водохранилище, проведенное по содержанию $Xл + \Phi$ (33.6 мг/м² мм) в поверхностном слое грунта, глубине водоема 6 м и среднегодовой скорости осадконакопления 2.6 мм/год, показало, что среднемноголетнее содержание $Xл$ в воде достигает 14.6 мкг/л.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Продукционные свойства водных экосистем зависят от комплекса биотических и абиотических факторов, включая геоморфологию водоема, условия на водосборе и динамику климата (Алимов, 2000; Структура..., 2018; Rahaman et al., 2022). Выдвинуты гипотезы, что с уменьшением размера водоема увеличивается накопление углерода (Winslow et al., 2015) и уменьшается длина пищевой цепи (Post et al., 2000). Изучение содержания и пространственного распределения осадочных пигментов в Уводьском водохранилище дополнило представления о продуктивности небольших водоемов (площадью $\leq 20 \text{ км}^2$) с неоднородным гидрологическим режимом, обусловленным уникальными особенностями. Так, геоморфология водохранилища характеризуется наличием участков “каньонного” типа (с плохо развитой литоралью, обрывистыми берегами, глубоким руслом), гидродинамика — контрастной проточностью (от нуля до 20.3 год^{-1}) из-за нерегулярной работы канала Волга—Увель, структура грунтового комплекса — переотложением аллювия.

Геоморфологические параметры Уводьского водохранилища способствуют зарастанию водоема гидрофитами, в отличие от крупных волжских водохранилищ, зарастающих преимущественно геллофитами и гигрогеллофитами (Папченков, Маркевич, 2003; Структура..., 2018). Можно ожидать, что пигментные показатели гидрофитов (Сigareва, Тимофеева, 2023), участвующих в формировании грунтов, способствуют некоторому уменьшению содержания Хл + Ф, увеличению относительного содержания каротиноидов и возрастанию отношения $C/(Хл + Ф)$ в отложениях.

Продукционные показатели планктона и бентоса неоднозначно связаны с гидродинамикой. Например, при высокой скорости течения в верхних водохранилищах обычно отмечается уменьшение концентрации пигментов в фитопланктоне и ДО (Минеева, 2004; Сigareва и др., 2013; Тимофеева и др., 2021). Однако в Уводьском водохранилище биомасса фитопланктона увеличивается (от 1.18 до 2.51 г/м^3) при работающем канале, обеспечивающем повышение турбулентности и проточности (Законнов и др., 2000; Маркевич, Елизарова, 2000). Средняя концентрация осадочных пигментов превышает таковую в крупных Чебоксарском и Горьковском водохранилищах с интенсивностью водообмена 20.9 и 6.1 год^{-1} соответственно (Сigareва и др., 2013; Тимофеева и др., 2021), что показывает отсутствие четкой связи между средним содержанием Хл + Ф в ДО и водообменом. В то же время в каждом из рассматриваемых водоемов отмечено повышение концентрации осадочных пигментов от наиболее проточных верхних участков к приплотинным.

Полученные результаты позволяют предположить, что особенности Уводьского водохранилища способствуют некоторому “выравниванию” значений продукционных показателей бентали. Признаком “выравнивания” можно считать уменьшение градиента концентраций пигментов между песчанистыми и илистыми отложениями: в Уводьском водохранилище содержание Хл + Ф в илах в 4.7 раз выше, чем в песках, по сравнению с водохранилищами Верхней Волги, где оно достигает 24 (Сigareва, Тимофеева, 2001). Факторами сглаживания неоднородности пространственного распределения осадочных пигментов могут быть гидродинамическая активность, функционирование планктонных и бентосных сообществ, климатические изменения, эвтрофирование (Fisher et al., 1980; Krol et al., 2011; Структура..., 2018; Hofman et al., 2021).

Количество Ф, зависящее, как правило, от неблагоприятных для фотосинтеза световых условий, в ДО Уводьского водохранилища характеризуется высокими значениями ($89.5 \pm 1.4\%$ в сумме с Хл) при небольшой вариабельности, как и в волжских водохранилищах, в которых глубина фотосинтетической зоны меньше глубины водоема (Сigareва и др., 2004; Структура..., 2018; Тимофеева и др., 2021). Для сравнения, в ДО крупных мелководных озер, в которых эвфотическая зона охватывает всю водную толщу, вклад Ф (в сумму с неразрушенным Хл) в ДО достигает 60% (Сigareва и др., 2022). Этот же показатель в фитопланктоне Уводьского водохранилища ($29.8 \pm 1.1\%$) и каскада волжских водохранилищ ($33.5 \pm 0.8\%$) оценивается сравнительно невысокими сходными величинами (Маркевич, Елизарова, 2000; Минеева, 2004).

Другие показатели физиологического состояния растительных сообществ и трансформации пигментного фонда (E_{480}/E_{665} и $E_{480}/1.7E_{665к}$) изменяются согласно содержанию Ф. Значения E_{480}/E_{665} (от 1.34 до 4.79, среднее 1.90 ± 0.19) в отложениях Уводьского водохранилища ниже, чем в ДО других волжских водохранилищ, включая Горьковское (Тимофеева и др., 2021). Для интегральных проб фитопланктона Уводьского водохранилища приведены значения E_{480}/E_{664} (аналога E_{480}/E_{665}) от 0.89 до 1.53 (Маркевич, Елизарова, 2000). При этом среднее значение E_{480}/E_{664} было 1.16 в июне 1993 г. и 1.11 в июле 1995 г., что близко к фитопланктону мезотрофных вод волжских водохранилищ (1.20 ± 0.01) (Минеева, 2004), а также для листьев макрофитов (Сigareва, Тимофеева, 2023). Сохранению растительных пигментов при невозможности их синтеза способствуют обычно бескислородные условия и афотическая среда (Cardoso-Silva et al., 2022).

Отношение $C/(Хл + Ф)$ в водных экосистемах существенно изменяется в зависимости от функ-

циональной активности растительных организмов и их сообществ. В фитопланктоне это отношение ~ 100 (Behrenfeld et al., 2005), в листьях макрофитов — 76, в стеблях — 408 (Сигарева, Тимофеева, 2023). В ДО отношение $C/(Хл + Ф)$ возрастает из-за деградации пигментов и в Уводьском водохранилище достигает 1300. В целом исследуемое отношение зависит от типа грунта и увеличивается в ряду: песчанистый и глинистый ил, торфянистый ил, глина и крупный песок.

Согласно работе (Möller, Scharf, 1986), диапазон концентраций $Хл + Ф$ в отложениях Уводьского водохранилища охватывает все трофические категории — от олиготрофной до гипертрофной. Наиболее часто регистрировали концентрации эвтрофного и мезотрофного типов, гораздо реже — олиготрофного и гипертрофного (табл. 1). Средняя для водоема концентрация $Хл + Ф$ с учетом площадей грунтов разного типа (58.5 ± 6.7 мкг/г с.о.) относится к мезотрофной категории. Такой результат соответствует мезотрофному статусу по пигментным характеристикам фитопланктона, полученным 20 лет назад. Согласно результатам 1993 г. и 1995 г. (Маркевич, Елизарова, 2000), в Уводьском водохранилище концентрация $Хл$ фитопланктона, вклад $Ф$ и индекс E_{480}/E_{664} соответствовали типично мезотрофным водам волжских водохранилищ, где $Хл = 5.4 \pm 0.1$ мкг/л, $Ф = 33.5 \pm 0.8\%$, $E_{480}/E_{664} = 1.20 \pm 0.01$ (Минеева, 2004). Однако, средняя концентрация $Хл + Ф$ в отложениях в 2012 г. соответствует верхнему пределу мезотрофии, тогда как концентрация $Хл$ и биомасса фитопланктона — среднему уровню мезотрофии. Судя по многолетней динамике растительных пигментов в воде и ДО, в 2012 г. наблюдали повышение продуктивности волжских водохранилищ (Структура..., 2018), и поэтому можно допустить, что концентрации $Хл$ фитопланктона Уводьского водохранилища в 1993 и 1995 гг. (5.1 и 5.7 мкг/л) были ниже, чем в период наших исследований. Ориентировочный расчет подтвердил реальность такого предположения: восстановленная концентрация $Хл$ планктонных водорослей в 2012 г. по содержанию $Хл + Ф$ в отложениях оценивается величиной 14.6 мкг/л, что характеризует трофическое состояние Уводьского водохранилища как типично эвтрофное (Винберг, 1960).

Уводьское водохранилище существенно отличается по пигментным характеристикам от крупного Горьковского водохранилища, воды которого поступают через канал Волга—Увody. Ряд показателей (площадь илов, содержание пигментов в отдельных типах грунта и в ДО в целом) свидетельствует, что заилиние и эвтрофирование в Уводьском водохранилище выражены более четко, чем в Горьковском. Так, мезотрофный статус Уводьского водохранилища характеризуется более высокими концентрациями осадочных пигментов,

чем в Горьковском водохранилище: в первом средняя концентрация $Хл + Ф$, рассчитанная с учетом площадей грунтов разного типа, в 2.3 раза больше, чем во втором (Тимофеева и др., 2021). Обе величины относятся к мезотрофной категории, но в Уводьском — к конечной фазе мезотрофии, в Горьковском — типичной мезотрофии. Различия концентраций по трофическому признаку выявлены и для отдельных типов грунта. Так, в Уводьском водохранилище для илов характерны эвтрофные величины, в Горьковском — мезотрофные. При этом в Уводьском водохранилище илы занимают большую часть площади (50%), чем в Горьковском (32%).

Интересно сравнение водохранилища с небольшим природным водоемом — оз. Мястро, сходным с Уводьским по площади (13.1 км²) и средней глубине (5.4 м). В этом озере концентрация осадочных пигментов невысокая (6.4 ± 6.2 мкг/г с.о.) (Смольская, Жукова, 2020), почти на порядок меньше, чем в водохранилище. Однако по литературным данным, концентрации $Хл$ в фитопланктоне сравниваемых водоемов сходны. В оз. Мястро в 1991–1998 гг. содержание $Хл$ было 4.3 ± 1.9 , в 2012 г. — 5.0 ± 5.2 мкг/л (Жукова и др., 2016), что сопоставимо с Уводьским водохранилищем в 1993 и 1995 гг. (Соловьева 1996; Маркевич, Елизарова, 2000). Сходство водоемов по концентрации $Хл$ в фитопланктоне не прослеживается, если учесть рассчитанную концентрацию $Хл$ (14.6 мкг/л) в фитопланктоне Уводьского в 2012 г. Причиной различий водоемов по содержанию растительных пигментов могла быть многолетняя динамика абиотических и биотических процессов, изменяющихся в водохранилище более значительно, чем в озере.

Выводы. Первые данные о растительных пигментах в ДО уникального по гидродинамике Уводьского водохранилища поддерживают гипотезу о более интенсивном накоплении углерода в небольших водоемах. Пространственное распределение растительных пигментов в ДО зависит от особенностей гидрологического режима, геоморфологии водохранилища, нерегулярной работы канала Волга—Увody и согласуется с характером грунта, как и в других естественных и техногенных водоемах. Показатели состояния пигментного фонда (вклад $Ф$, отношение каротиноидов и $Хл$, отношение органического углерода к сумме $Хл + Ф$) соответствуют сильной степени разрушения, которая обычно отмечается при недостаточной для фотосинтеза облученности в гипolimнионе глубоких участков водоемов, а также при аэрации за счет интенсивной гидродинамической активности. Трофическое состояние Уводьского водохранилища по осадочным пигментам характеризуется как конечная стадия мезотрофии, по рассчитанной концентрации $Хл$ фитопланктона — типично эвтрофное, что свидетельствует об эвтрофировании за счет первичной продукции ОВ

планктона. Показатели продуктивности (концентрация осадочных пигментов, вклад илов в грунтовом комплексе) отражают более высокую скорость эвтрофирования и заиления Уводьского водохранилища по сравнению с Горьковским водохранилищем, связь с которым осуществляется через канал Волга–Увось. Пигментные характеристики ДО могут применяться для получения интегральной информации о продукционных свойствах водных экосистем, в том числе для восстановления средней концентрации Хл в фитопланктоне, с целью мониторинга и разработки способов управления водными ресурсами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100099-5 и 121051100104-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. 1987. Водохранилища. М.: Мысль.
- Алимов А.Ф. 2000. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. 1975. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука.
- Винберг Г.Г. 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Долотов А.В., Гапеева М.В., Козловский Е.В. 2010. Оценка загрязнения тяжелыми металлами Уводьского водохранилища // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 1. С. 58.
- Жукова Т.В., Михеева Т.М., Адамович Б.В. и др. 2016. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясро, Баторино (2015 год). Минск: Белорус. гос. ун-т.
- Законнов В.В. 2007. Осадкообразование в водохранилищах волжского каскада: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН. 39 с.
- Законнов В.В., Куражковский А.Ю., Маркевич Г.И. 2000. Экология Уводьского водохранилища. Донные отложения и особенности их формирования // Экология, биоразнообразие и систематика водных беспозвоночных. Ч. 2. Борок. С. 279. Деп. в ВИНТИ. 17.01.2000, № 73-B00.
- Ковалева И.В., Финенко З.З. 2019. Количественные закономерности изменения относительного содержания хлорофилла при совместном действии света и температуры у диатомовых водорослей // Вопросы современной альгологии. № 3(21). С. 28.
- Маркевич Г.И., Елизарова В.А. 2000. Экология Уводьского водохранилища. Фитопланктон и фотосинтетические пигменты // Экология, биоразнообразие и систематика водных беспозвоночных. Ч. 2. Борок. С. 170. Деп. в ВИНТИ. 17.01.2000, № 73-B00.
- Минеева Н.М. 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука.
- Папченков В.Г., Маркевич Г.И. 2003. Флора и растительность Уводьского водохранилища // Биология внутр. вод. № 4. С. 18.
- Румянцев В.А., Коронкевич Н.И., Измайлова А.В. и др. 2021. Водные ресурсы рек и водоемов России и антропогенные воздействия на них // Изв. РАН. Сер. геогр. Т. 85. № 1. С. 120.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. 2001. Растительные пигменты в донных отложениях как показатели трофического состояния водохранилищ Верхней Волги // Проблемы региональной экологии. № 2. С. 23.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. 2023. Пигментные характеристики макрофитов Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 3. С. 420. <https://doi.org/10.31857/S0320965223030233>
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. 2004. Особенности распределения растительных пигментов в донных отложениях Чебоксарского водохранилища // Гидробиол. журнал. Т. 40. № 5. С. 27.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. 2013. Оценка влияния фитопланктона на продукционные свойства донных отложений Чебоксарского водохранилища по растительным пигментам // Вода: химия и экология. № 1. С. 72.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. 2022. Растительные пигменты и органическое вещество в донных отложениях крупных мелководных озер Северо-Запада России // Геохимия. Т. 67. № 12. С. 1284.
- Смольская О.С., Жукова А.А. 2020. Содержание растительных пигментов в донных отложениях озер Нарочь, Мясро и Баторино // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. № 2. С. 18.
- Соловьева В.В. 1996. Фитопланктон Уводьского водохранилища // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. Ярославль: Ярослав. гос.-техн. ун-т. С. 95.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. 2018. М.: РАН.
- Тимофеева Н.А., Сигарева Л.Е., Законнов В.В. 2021. Вариабельность трофии донных биотопов Горьковского водохранилища по осадочным пигментам // Вод. ресурсы. Т. 48. № 1. С. 70.
- Тищенко П.Я., Медведев Е.В., Барабанищikov Ю.А. и др. 2020. Органический углерод и карбонатная система в донных отложениях мелководных бухт залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. Т. 65. № 6. С. 583.
- Behrenfeld M.J., Boss E., Siegel D.A., Shea D.M. 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space // Glob. Biogeochem. Cycles. V. 19. № 1. GB1006. <https://doi.org/10.1029/2004GB002299>
- Bernát G., Boross N., Somogyi B. et al. 2020. Oligotrophication of Lake Balaton over a 20-year period and its implications for the relationship between phytoplankton and zooplankton biomass // Hydrobiologia. V. 847. № 19. P. 3999. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04384-x>
- Cabecinha E., Van den Brink P.J., Cabral J.A. et al. 2009. Ecological relationships between phytoplankton communities and different spatial scales in European reservoirs: implications at catchment level monitoring programmes // Hydrobiologia. V. 628. № 1. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9731-y>
- Cardoso-Silva S., Mizael J.O.S.S., Frascareli D. et al. 2022. Geochemistry and sedimentary photopigments as proxies to reconstruct past environmental changes in a subtropical reservoir // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 29. № 19. P. 28495. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18518-2>

- Fisher J.B., Lick W.J., McCall P.L., Robbins J.A. 1980. Vertical mixing of lake sediments by tubificid oligochaetes // J. Geophys. Res. V. 85. № C7. P. 3997.
- Garnier M., Holman I. 2019. Critical review of adaptation measures to reduce the vulnerability of European drinking water resources to the pressures of climate change // Environ. Man. V. 64. № 2. P. 138. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01184-5>
- Gushulak C.A., Leavitt P.R., Cumming B.F. 2021. Basin-specific records of lake oligotrophication during the middle-to-late Holocene in boreal northeast Ontario, Canada // The Holocene. V. 31. № 10. P. 1539. <https://doi.org/10.1177/09596836211025972>
- Hofmann A.M., Kuefner W., Mayr C. et al. 2021. Unravelling climate change impacts from other anthropogenic influences in a subalpine lake: a multi-proxy sediment study from Oberer Soiernsee (Northern Alps, Germany) // Hydrobiologia. V. 848. № 18. P. 4285. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04640-8>
- Krol M.S., de Vries M.J., van Oel P.R., de Araújo J.C. 2011. Sustainability of small reservoirs and large scale water availability under current conditions and climate change // Water Resour. Man. V. 25. № 12. P. 3017. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9787-0>
- 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>
- Makri S., Lami A., Lods-Crozet B. et al. 2019. Reconstruction of trophic state shifts over the past 90 years in a eutrophicated lake in western Switzerland, inferred from the sedimentary record of photosynthetic pigments // J. Paleolimnol. V. 61. № 2. P. 129. <https://doi.org/10.1007/s10933-018-0049-5>
- Moir K.E., Hickey M.B.C., Leavitt P.R. et al. 2018. Paleolimnological proxies reveal continued eutrophication issues in the St. Lawrence River Area of Concern // J. Great Lakes Res. V. 44. P. 357. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.02.001>
- 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>
- Phillips G., Pietiläinen O.P., Carvalho L. et al. 2008. Chlorophyll-nutrient relationships of different lake types using a large European dataset // Aquat. Ecol. V. 42. № 2. P. 213. <https://doi.org/10.1007/s10452-008-9180-0>
- Post D., Pace M., Hairston N. 2000. Ecosystem size determines food-chain length in lakes // Nature. V. 405. P. 1047. <https://doi.org/10.1038/35016565>
- Rahaman M., Masroor M., Rehman S. et al. 2022. State of art of review on climate variability and water resources: bridging knowledge gaps and the way forward // Water. Res. V. 49. № 4. P. 699. <https://doi.org/10.1134/S0097807822040169>
- Rühland K.M., Paterson A.M., Smol J.P. 2015. Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence // J. Paleolimnol. V. 54. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9837-3>
- 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>
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H. 2015. Does lake size matter? Combining morphology and process modeling to examine the contribution of lake classes to population-scale processes // Inland Waters. V. 5. № 1. P. 7. <https://doi.org/10.5268/IW-5.1.740>
- Wu Q., Li Q., Luo H. et al. 2022. Comparison in phytoplankton diversity-productivity-community stability between river-type reservoir and lake-type reservoir // J. Ocean. Limnol. V. 40. № 4. P. 1485. <https://doi.org/10.1007/s00343-021-1175-x>

Content of Pigments in the Bottom Sediments in a Small Valley—Channel Reservoir

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@ibi.ru

This paper presents the first data on the content of plant pigments in the bottom sediments of the Uvod Reservoir (Volga basin, Russia), unique in its hydrological regime, which support the hypothesis of more intensive carbon accumulation in small water bodies. It is established that the average concentration of chlorophyll *a* and its transformation products at the stations is 62.6 ± 10.0 µg/g dry sediment, 35.2 ± 4.5 mg/(m² mm) of wet sediment, and 0.73 ± 0.09 mg/g organic matter of sediments. The ratio of organic carbon to the pigment concentration varies within 400–6000 depending on the type of bottom sediments, which significantly exceeds the values known for macrophytes and phytoplankton. Despite the features of hydrodynamics and geomorphology of the reservoir, the spatial distribution of sedimentary pigments is consistent with the structure of the bottom sediment complex, which is typical for water bodies of different types. A decrease in differences between the pigment concentrations in the sandy and silty biotopes of the Uvod Reservoir compared to the Upper Volga was noted. Average concentration of chlorophyll *a* with pheopigments (58.5 ± 6.7 µg/g of dry sediment), calculated considering the areas of bottom sediments of different types, in the Uvod Reservoir is 2.3 times higher than in the Gorky Reservoir (25.3 ± 1.5 µg/g), from which water inflows through the Volga—Uvod Canal. According to the content of sedimentary pigments, the trophic state of the reservoir is mesotrophic. Features of eutrophication in the Uvod Reservoir are more distinctly expressed than in the Gorky Reservoir.

Keywords: chlorophyll *a*, pheopigments, trophic state, bottom sediments, Uvod Reservoir