

ФИТОПЛАНКТОН,  
ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 581.132.1+556.555

СОВРЕМЕННОЕ ТРОФИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БЕНТАЛИ  
ИВАНЬКОВСКОГО И УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ  
ПО СОДЕРЖАНИЮ ОСАДОЧНЫХ ПИГМЕНТОВ

© 2021 г. Л. Е. Сигарева<sup>а</sup>, \*, Н. А. Тимофеева<sup>а</sup>, Р. А. Ложкина<sup>а</sup>

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

\*e-mail: sigareva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 20.08.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 28.10.2020 г.

Приведены новые данные по содержанию хлорофилла *a* с феопигментами в донных отложениях Иваньковского и Угличского водохранилищ Верхней Волги (Россия), полученные в 2019 г. Проанализированы связи пигментов с характеристиками грунтов и глубиной. Установлено, что в настоящее время средние концентрации суммы хлорофилла *a* и феопигментов достигают в Иваньковском водохранилище 156, Угличском – 105 мкг/г сухого осадка (с.о.), которые превышают значения, полученные 20 лет назад (126 и 79 мкг/г с.о. соответственно). Повышение концентрации осадочных пигментов отмечено преимущественно в зонах илонакопления. Средневзвешенное содержание осадочных пигментов, рассчитанное с учетом площадей разнотипных грунтов, позволяет оценить трофический статус бентали в Иваньковском водохранилище (125 мкг/г с.о.) как начальную стадию гипертрофии, в Угличском (52.8 мкг/г с.о.) – как конечный этап мезотрофии. В обоих водоемах трофическое состояние бентали соответствует эвтрофному статусу пелагиали.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, феопигменты, донные отложения, трофическое состояние, Иваньковское и Угличское водохранилища

DOI: 10.31857/S0320965221020145

ВВЕДЕНИЕ

Исследования трофического состояния водоемов актуальны в условиях глобального потепления климата – одного из главных факторов эвтрофирования (Девяткин, 1975; Пырина и др., 1975; Даценко, 2007; Мартынова, 2010; Литвинов и др., 2014; Alimov, Golubkov, 2014).

Однако механизм действия повышенной температуры на гидробионтов в масштабе водоема изучен недостаточно. В одних работах сообщается о гибели организмов непосредственно в период усиления прогрева воды, в других – об отсутствии явного эффекта или об отдаленных последствиях (Девяткин, 1975; Лазарева, Соколова, 2013; Mineeva, 2019; Koryulov et al., 2020).

Среди показателей трофии особое место занимают фотосинтетические пигменты как универсальные маркеры продукционных и деструкци-

онных процессов (Винберг, 1960; Пырина, 1966; Möller, Scharf, 1986; Leavitt, 1993; Jiménez et al., 2015; Mineeva, 2019). Для изучения трофии информативны данные о распределении растительных пигментов в водной толще и ДО. Растительные пигменты в ДО – индикаторы продуктивности экосистемы за многие годы (Szymczak-Żyła, Kowalewska, 2009; Reuss et al., 2010; Szymczak-Żyła et al., 2011; Sigareva et al., 2020). Особенности абиотических условий в пелагиали и бентали могут быть причиной различий компонентов экосистемы по трофии (Сигарева, 2012; Mineeva и др., 2020). При изучении формирования трофического состояния динамичных экосистем водохранилищ необходимо учитывать пространственно-временное распределение показателей функционирования первичного звена (Пырина, 1966; Даценко, 2007; Мартынова, 2010; Лазарева, Соколова, 2013; Alimov, Golubkov, 2014; Jeppesen et al., 2015; Jiménez et al., 2015; Tse et al., 2015; Boullion, 2020; Koryulov et al., 2020). Вопросы трофии водохранилищ изучаются многопланово, но в основном на фитопланктоне.

Цель работы – анализ содержания растительных пигментов в ДО для оценки современного

**Сокращения:** ДО – донные отложения; с.о. – сухой осадок; *T* – температура; *Ф* – феопигменты; *Хл a* – хлорофилл *a*; *Хл + Ф* – в сумме хлорофилл *a* с феопигментами; *C<sub>v</sub>* – коэффициент вариации; *E* – оптическая плотность ацетонového экстракта пигментов; *R*<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; *Z* – прозрачность.

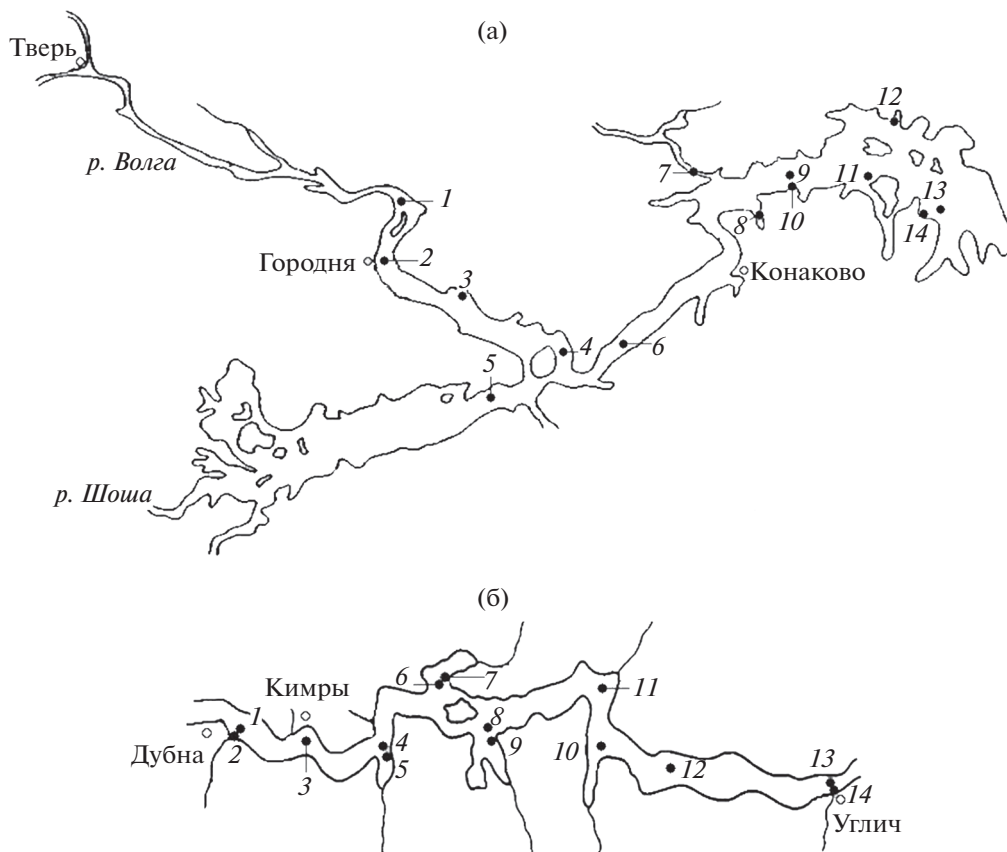


Рис. 1. Схемы расположения станций (1–14) в Иваньковском (а) и Угличском (б) водохранилищах.

трофического состояния бентали Иваньковского и Угличского водохранилищ, различающихся по продуктивности фитопланктона.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собирали в комплексной экспедиции ИБВВ РАН в августе 2019 г. на 14 станциях в Иваньковском водохранилище и 14 станциях – в Угличском (рис. 1). Пробы донных отложений отбирали модифицированным дночерпателем Экмана-Берджа (ДАК-250, Россия) из верхнего 5-сантиметрового слоя. Для анализа пигментов использовали спектрофотометрический метод в общем ацетоновом экстракте (Сигарева, 2012). Концентрации Хл + Ф рассчитывали по уравнениям Лоренцена (Lorenzen, 1967). В качестве показателя соотношения между концентрациями каротиноидов и хлорофилла использовали индексы – отношение оптических плотностей экстракта до ( $E_{480}/E_{665}$ ) и после подкисления ( $E_{480}/1.7E_{665к}$ ). Второй индекс учитывает наличие феопигментов, что в исследованиях сильно разрушенного фонда растительных пигментов в донных отложениях особенно важно. Влажность образцов грунта и абиотические показатели водной

среды (глубина, прозрачность, температура) определяли общепринятыми методами. Воздушно-сухую объемную массу грунта рассчитывали по формуле для донных отложений волжских водохранилищ (Сигарева, 2012).

Иваньковское и Угличское водохранилища расположены в зоне умеренно-континентального климата и подвергаются антропогенному влиянию (Иваньковское..., 1978; Григорьева и др., 2000; Экологические..., 2001). По морфологической классификации Иваньковское водохранилище относится к сложным котловинно-долинным с большой площадью мелководий (58%), Угличское – к простым долинным руслового типа (Edelstein, 1995). Площадь Иваньковского и Угличского водохранилищ – 327 и 249 км<sup>2</sup>, коэффициент водообмена – 10.6 и 10.1 год<sup>-1</sup>, средняя глубина – 3.4 и 5.0 м, площадь зарослей – 23 и 5% соответственно (Экологические..., 2001; Poddubnyi et al., 2017). Первичная продукция органического вещества в Угличском водохранилище создается в основном за счет фитопланктона, в Иваньковском – фитопланктона и макрофитов. Наибольшей продуктивностью планктонных водорослей в Иваньковском водохранилище выделяется неглубокий, сильно зарастающий высшей водной расти-

**Таблица 1.** Характеристики воды и донных отложений на станциях в Иваньковском водохранилище (2019 г.)

Номер станции	Расположение	Глубина, м	Вода		Донные отложения		
			Z, м	T, °C	влажность, %	объемная масса, г/см <sup>3</sup>	тип
Волжский плес							
1	У дер. Лисицы	8.0	1.1	19.4	26.2	1.38	Илистый песок
2	У с. Городня	11.0	1.2	19.2	46.4	0.81	Песчанистый ил
3	Затопленное оз. Видогощь	18.0	1.5	17.8	84.4	0.17	Черный глинистый ил
Шошинский плес							
4	Выше устья р. Шоша	10.0	1.1	17.6	66.6	0.42	Песчанистый ил с растительными остатками
5	Шошинский залив	2.8	0.5	16.5	76.5	0.28	Песчанистый ил
Иваньковский плес							
6	У п. Свердлово	10.0	1.1	17.8	72.9	0.33	Песчанистый ил
7	Выше устья р. Созь	2.5	1.2	17.4	71.1	0.35	То же
8	Мошковичский залив	4.0	0.7	28.1	31.3	1.21	Илистый песок
9	Против Корчевского залива, русло	11.0	1.2	18.8	63.9	0.47	Песчанистый ил
10	То же, побережье	2.0	0.9	18.6	78.9	0.24	Глинистый ил
11	У о. Уходово	11.0	1.0	17.7	59.9	0.54	Песчанистый ил
12	Перетрусовский залив	2.8	0.9	17.4	59.7	0.54	То же
13	У о. Липня, русло	15.0	1.0	17.2	85.4	0.16	Глинистый ил
14	То же, побережье	1.1	0.9	16.7	41.1	0.94	Илистый песок

тельностью Шошинский плес, в Угличском – средний участок (Калязинский плес) с площадью мелководий 40%, низкой скоростью течения (<0.1 м/с) и значительной боковой приточностью (Иваньковское..., 1978; Пырина, Ляшенко, 2005; Законнов и др., 2016; Законнов и др., 2018; Mineeva, 2019). По данным последней грунтовой съемки, в Иваньковском водохранилище трансформированные грунты составляли 15, крупнодисперсные наносы – 47, тонкодисперсные отложения – 38% площади, в Угличском – 18, 57 и 25% соответственно. Скорость осадконакопления в расчете на площадь при НПУ в Иваньковском – 1.7, Угличском – 1.8 мм/год, скорость илонакопления – 3.0 и 4.0 мм/год соответственно (Законнов и др., 2016, 2018).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В августе 2019 г. отмечена пониженная температура воды по сравнению с характерными величинами для этого месяца (табл. 1, 2). Однако предшествующие периоды (зима, весна и начало лета) были аномально теплыми, максимальная температура воздуха достигала 31.2°C. Прозрачность воды варьировала от 0.5 до 1.5 м в Иваньковском и от 0.8 до 1.7 м в Угличском водохранилищах (табл. 1, 2). Утроенные значения прозрач-

ности, характеризующие нижнюю границу фотосинтезирующей зоны, как правило, были меньше глубины на станции, что свидетельствует об отсутствии благоприятных световых условий для активного развития микробиобентоса. Исключения составляли несколько прибрежных станций. Среди типов грунта в исследуемых образцах отмечены илистый песок, песчанистый и глинистый илы. В песчанистых грунтах встречались осколки раковин моллюсков (табл. 1, 2). В котловинно-долинном Иваньковском водохранилище содержание Хл + Ф в ДО изменялось от 10.3 до 710 мкг/г сухого грунта ( $C_v = 115\%$ ). В русловом Угличском водохранилище диапазон концентраций был меньше (11.8–214.4 мкг/г сухого грунта) и распределение более равномерное ( $C_v = 62\%$ ) (табл. 3, 4). Распределение пигментов по станциям согласуется с водно-физическими свойствами донных отложений. Низкие концентрации Хл + Ф приурочены к песчаным грунтам с небольшой влажностью и высокой воздушно-сухой объемной массой (ст. 8 в Иваньковском, ст. 3 и 7 в Угличском).

Максимальные концентрации Хл + Ф отмечены на глубоководных станциях в глинистых илах: в Иваньковском водохранилище в Волжском плесе (ст. 3 – затопленное оз. Видогощь, 18 м), в Угличском на среднем участке (ст. 10 – у г. Каля-

**Таблица 2.** Характеристики воды и донных отложений на станциях в Угличском водохранилище в 2019 г.

Номер станции	Расположение	Глубина, м	Вода		Донные отложения		
			Z, м	T, °C	влажность, %	объемная масса, г/см <sup>3</sup>	тип
Верхний участок							
1	Ниже устья р. Дубна, русло	4.5	1.3	17.1	60.2	0.53	Песчанистый ил с растительными остатками
2	То же, у берега	4.0	1.2	16.2	54.6	0.64	Песчанистый ил
3	У г. Кимры	8.5	1.3	17.8	27.8	1.33	Илистый песок
4	У пос. Белый городок, русло	11.0	1.2	17.7	67.4	0.41	Песчанистый ил
5	То же, побережье	4.0	0.9	17.7	70.4	0.36	То же
Средний участок							
6	Устье р. Медведица, русло	9.0	1.2	17.4	59.7	0.54	Песчанистый ил
7	То же, побережье	2.1	1.0	16.9	33.9	1.14	Илистый песок с раковинами моллюсков
8	Ниже устья р. Нерль	13.0	1.1	16.9	70.7	0.36	Песчанистый ил
9	То же, побережье	1.5	0.8	15.6	74.7	0.30	То же
10	У г. Калязин	14.0	1.0	14.7	82.4	0.20	Глинистый ил
11	Ниже устья р. Кашинка	10.0	1.1	17.1	77.1	0.27	Песчанистый ил
Нижний участок							
12	Ниже с. Прилуки	16.0	1.2	16.7	82.1	0.20	Песчанистый ил
13	Против Грехова ручья, русло	14.0	1.4	16.6	82.1	0.20	Глинистый ил
14	То же, побережье	3.0	1.7	15.3	79.4	0.24	Песчанистый ил с раковинами моллюсков

**Таблица 3.** Пигментные показатели донных отложений Иваньковского водохранилища в 2019 г.

Номер станции	Хл + Ф		Ф, %	$E_{480}/E_{665}$	$E_{480}/1.7E_{665к}$	Трофическое состояние
	мкг/г с.о.	мг/(м <sup>2</sup> мм)				
1	12.2	16.9	69.6	1.82	1.30	о
2	223.9	182.4	76.9	1.95	1.34	г
3	710.0	123.0	61.2	1.79	1.34	г
4	112.7	47.8	70.3	2.01	1.43	э
5	155.9	43.0	75.2	2.28	1.58	г
6	127.0	41.5	75.3	2.24	1.54	г
7	72.1	25.5	80.9	2.17	1.44	э
8	10.3	12.5	74.4	2.37	1.65	о
9	94.7	44.3	68.1	2.00	1.44	э
10	198.7	48.4	78.2	2.35	1.59	г
11	99.5	53.5	67.0	1.90	1.37	э
12	41.9	22.6	87.6	2.68	1.72	м
13	295.6	47.4	71.2	2.14	1.51	г
14	35.3	33.2	47.2	1.30	1.05	м

Примечание. Здесь и в табл. 4: о – олиготрофное, м – мезотрофное, э – эвтрофное, г – гипертрофное.

**Таблица 4.** Пигментные показатели донных отложений Углицкого водохранилища в 2019 г.

Номер станции	Хл + Ф		Ф, %	$E_{480}/E_{665}$	$E_{480}/1.7E_{665к}$	Трофическое состояние
	мкг/г с.о.	мг/(м <sup>2</sup> мм)				
1	58.3	37.1	88.3	3.70	2.35	м
2	71.2	37.8	70.8	2.65	1.88	э
3	11.9	15.9	81.2	2.26	1.50	о
4	96.6	39.7	76.7	2.61	1.79	э
5	99.7	36.4	79.1	2.49	1.68	э
6	49.6	26.9	76.5	2.25	1.54	м
7	11.8	13.4	73.8	1.85	1.29	о
8	122.4	44.0	72.3	2.24	1.57	г
9	202.9	61.0	68.8	1.93	1.38	г
10	214.4	42.5	77.0	2.09	1.42	г
11	146.7	39.2	78.3	2.26	1.53	г
12	171.3	34.6	78.1	2.28	1.55	г
13	156.3	31.5	78.8	2.09	1.41	г
14	62.8	14.9	73.1	1.96	1.37	э

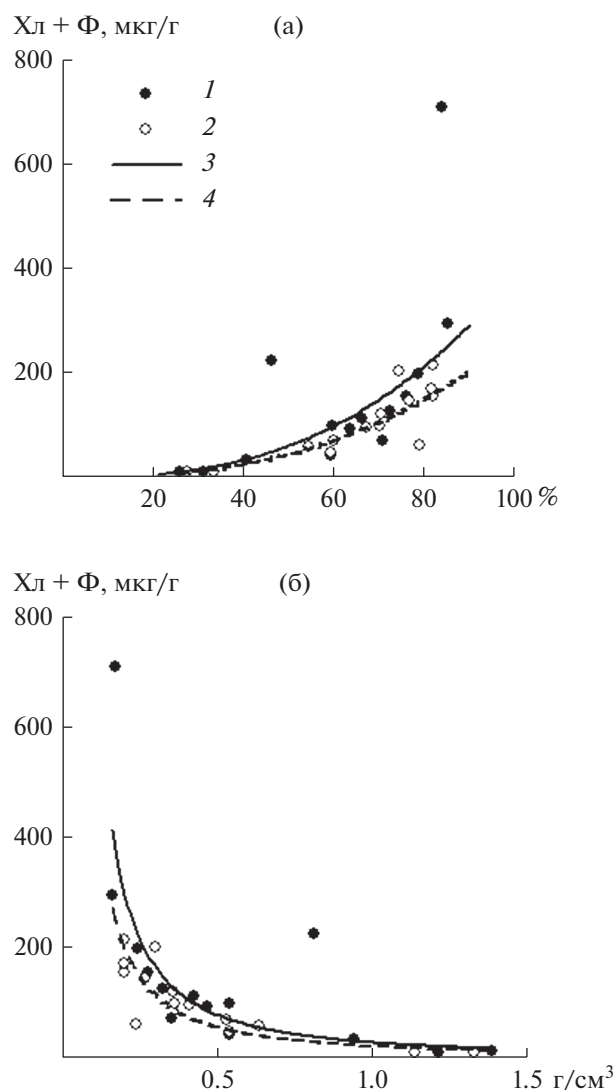
**Таблица 5.** Средние значения пигментных характеристик, влажности и воздушно-сухой объемной массы разнотипных грунтов в Иваньковском и Углицком водохранилищах в 2019 г.

Показатель	Илистый песок	Песчанистый ил	Глинистый ил
Хл + Ф, мкг/г с.о.	$19.3 \pm 8.0$	$116 \pm 19.7$	$401 \pm 157$
	$11.9 \pm 0.1$	$108 \pm 16.4$	$185 \pm 29$
Хл + Ф, мг/(м <sup>2</sup> мм)	$20.9 \pm 6.3$	$57.6 \pm 18.2$	$72.9 \pm 25.0$
	$14.6 \pm 1.2$	$37.1 \pm 3.7$	$37.0 \pm 5.5$
Ф, %	$63.8 \pm 8.4$	$75.1 \pm 2.4$	$70.2 \pm 4.9$
	$77.5 \pm 3.7$	$76.2 \pm 1.7$	$77.9 \pm 0.9$
$E_{480}/E_{665}$	$1.8 \pm 0.3$	$2.2 \pm 0.1$	$2.1 \pm 0.2$
	$2.1 \pm 0.2$	$2.4 \pm 0.2$	$2.1 \pm 0.0$
$E_{480}/1.7E_{665к}$	$1.3 \pm 0.2$	$1.5 \pm 0.04$	$1.5 \pm 0.1$
	$1.4 \pm 0.1$	$1.7 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.0$
Влажность, %	$32.9 \pm 4.4$	$64.6 \pm 3.4$	$82.9 \pm 2.0$
	$30.8 \pm 3.1$	$69.6 \pm 2.9$	$82.2 \pm 0.1$
Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	$1.2 \pm 0.1$	$0.5 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.0$
	$1.2 \pm 0.1$	$0.4 \pm 0.0$	$0.2 \pm 0.0$

Примечание. Над чертой – Иваньковское водохранилище, под чертой – Углицкое.

зин, 14 м). Группировка данных по типу грунта показала повышение содержания Хл + Ф от песков к илам (табл. 5). Величины в 2019 г. в целом превышали полученные ранее (Сигарева, Тимофеева, 2001). Так, в 1996–1998 гг. в Иваньковском водохранилище средние концентрации Хл + Ф в илистом песке были  $21.7 \pm 0.0$ , глинистом иле –  $160 \pm 24.0$ ; в Углицком –  $14.8 \pm 3.4$  и  $86.3 \pm 15.6$  мкг/г с.о. соответственно.

Участки с проникновением солнечной радиации до дна (ст. 7, 10, 14 в Иваньковском и ст. 5, 7, 14 в Углицком водохранилищах) не выделялись четкими признаками развития микрофитобентоса, и в целом пигментный фонд в донных отложениях находился в сильно деградированном виде. В сумме Хл + Ф в основном преобладали феопигменты: 47–88% в Иваньковском и 69–88% в Углицком (табл. 3, 4). Другой показатель состояния пигментного фонда – соотношение каротиноид-



**Рис. 2.** Зависимости концентрации Хл *a* с феопигментами в донных отложениях от влажности (а) и воздушно-сухой объемной массы (б) грунта в Ивановском (1, 3) и Угличском (2, 4) водохранилищах.

дов и хлорофилла – тоже отражал высокую степень деградации, поскольку соответствующие индексы ( $E_{480}/E_{665}$  и  $E_{480}/1.7E_{665к}$ ) были существенно больше величин, отмеченных для фитопланктона водохранилищ (Mineeva, 2019).

Зависимости между биотическими и абиотическими параметрами экосистем прослеживали по связям концентрации пигментов с характеристиками грунтов и глубиной водной толщи. Нелинейный тип связи выявлен между Хл + Ф и влажностью при высоких коэффициентах детерминации  $R^2$  (0.71 в Ивановском, 0.88 в Угличском) (рис. 2а), а также с воздушно-сухой объемной массой (0.71 в Ивановском, 0.83 в Угличском) (рис. 2б). Более тесная связь между исследованными показателями в Угличском во-

дохранилище согласуется с меньшей изменчивостью концентраций Хл + Ф по площади дна по сравнению с Ивановским.

Связь содержания осадочных пигментов с глубиной наиболее четко выражена в Ивановском водохранилище. Прямая зависимость Хл + Ф от глубины в Ивановском водохранилище выявлена при коэффициенте детерминации 0.46, в Угличском – 0.22 в (рис. 3а). Связь Хл + Ф с отношением глубины к прозрачности воды характеризуется положительными значениями при коэффициенте детерминации 0.29 в обоих водохранилищах (рис. 3б). Эти связи осадочных пигментов отражают усиление накопления тонкодисперсной взвеси и улучшение сохранения пигментов в более глубоких местах водоемов.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамические экосистемы волжских водохранилищ сложны для интерпретации трофического состояния, поскольку параметры потенциальной (концентрация биогенных элементов в воде) и реализованной (первичная продукция и содержание Хл фитопланктона) продуктивности их экосистем не совпадают (Экологические..., 2001). Полевые наблюдения выявили тенденцию повышения продуктивности верхневолжских водохранилищ в многолетнем аспекте. Концентрации Хл *a* в воде в Угличском водохранилище заметно возросли с конца XX в. к настоящему времени от мезотрофных до эвтрофных значений (Mineeva, 2019). Эвтрофный статус Ивановского водохранилища сохраняется на протяжении последних 50 лет (Иваньковское..., 1978; Пырина, Ляшенко, 2005; Mineeva, 2019).

Градиент гидрологических характеристик, особенности морфометрии участков водоема обуславливают разнообразие трофических условий в бентали. По данным настоящей работы, в соответствии с градицией водоемов по содержанию Хл + Ф в ДО (Möller, Scharf, 1986), трофическое состояние бентали на отдельных участках изменяется от олиготрофного до гипертрофного. Олиготрофные условия свойственны участкам с песчаными наносами, мезо-, эв-, гипертрофные – с разнотипными илами (табл. 5). По средней арифметической концентрации пигментов Ивановское относится к гипертрофной категории, Угличское – к эвтрофной (табл. 6). Средние концентрации осадочных пигментов в 2019 г. возросли на 29% в Ивановском и 33% в Угличском водохранилищах по сравнению с 1996–1998 гг. (Сигарева, Тимофеева, 2001). В этот же период средневзвешенное содержание Хл + Ф, рассчитанное с учетом площади песчаных наносов и илистых отложений, увеличилось в Ивановском от 48.2 до 125, Угличском водохранилище – от 36.4 до 52.8 мкг/г с.о. Согласно средневзвешенным концентрациям,

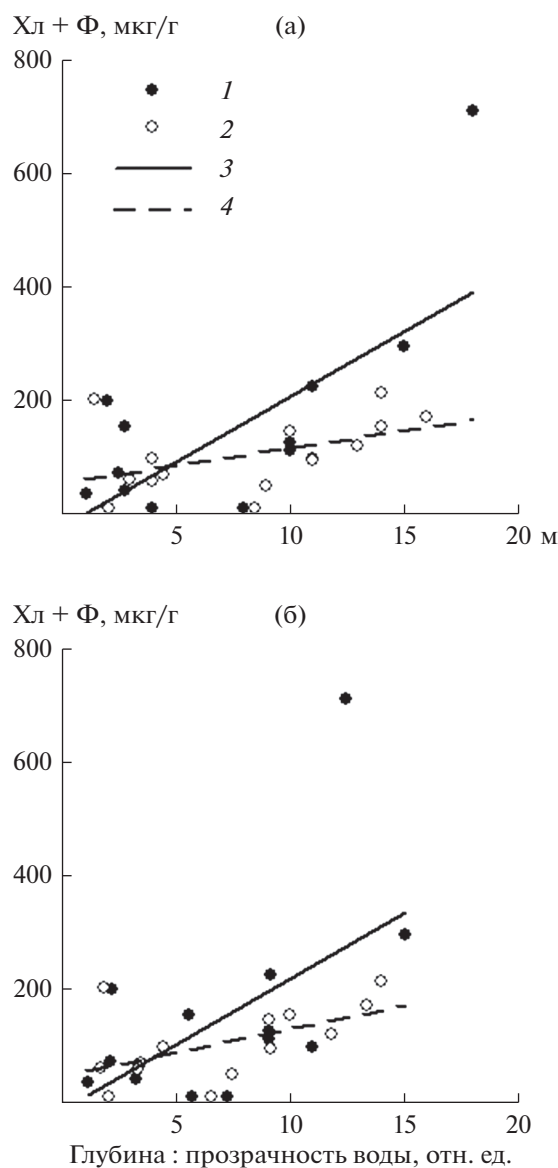
трофическое состояние бентали обоих водоемов 20 лет назад было мезотрофным, в настоящее время Иваньковское водохранилище находится в начальной стадии гипертрофного, а Угличское – конечной стадии мезотрофного.

Следовательно, трофический статус бентали водохранилищ близок к эвтрофному, отмечаемому в настоящее время по хлорофиллу фитопланктона. Во все годы наблюдений уровень трофии нижнего яруса экосистемы Иваньковского водохранилища превышает таковой в Угличском.

Одна из причин повышения продукционных показателей экосистем исследованных водохранилищ – потепление климата, характеризующееся повышенными значениями температуры воздуха (преимущественно зимой и весной), резкой сменой погодных условий в короткие промежутки времени и аномальными природными явлениями. Потепление климата стали регистрировать в районе Верхней Волги (Рыбинское водохранилище) после 1976 г. (Литвинов, и др., 2014; Законнова, Литвинов, 2016). Показана положительная связь продукционных характеристик волжского фитопланктона с температурой воды как с одним из гидрофизических факторов (Пырина, 1966; Девяткин, 1975; Пырина и др., 1975; Девяткин и др., 2000). При аномально высокой температуре воды отмечен значительный рост биомассы фитопланктона, бактериопланктона, простейших и зоопланктона (Лазарева, Соколова, 2013; Kopylov et al., 2020). Увеличение продуктивности сообществ планктонных организмов приводит к возрастанию седиментации детрита и обогащению ДО органическим веществом, содержащим растительные пигменты.

Данные по пигментам в фитопланктоне и ДО позволяют предположить, что экосистемы Иваньковского и Угличского водохранилищ подвергаются тепловому эвтрофированию за счет возрастания доступности биогенных элементов для растительных организмов. Более высокая продуктивность экосистемы Иваньковского водохранилища обусловлена интенсивным развитием как фитопланктона, так и высшей водной растительности (Пырина, Ляшенко, 2005; Mineeva, 2019). Эвтрофирование слабо заросшего макрофитами Угличского водохранилища происходит преимущественно за счет фитопланктона.

**Выводы.** Распределение осадочных пигментов зависит от водно-физических свойств ДО, что отражает взаимосвязанные изменения пространственно-временной структуры грунтов с гидрохимическими и биологическими показателями функционирования экосистем водохранилищ. В настоящее время концентрации растительных пигментов в ДО котловинно-долинного Иваньковского и руслового долинного Угличского водохранилищ характеризуются более высокими значениями, чем 20 лет назад. Свойственная во-



**Рис. 3.** Связь концентрации Хл *a* с феопигментами в донных отложениях с глубиной (а) и отношением глубина : прозрачность (б) в Иваньковском (1, 3) и Угличском (2, 4) водохранилищах.

дохранилищам динамичность гидрологических условий способствует формированию зон с разной потенциальной продуктивностью – от олиготрофных до гиперэвтрофных. Учет соотношения грунтов разного типа позволяет оценить современное трофическое состояние бентали в Иваньковском водохранилище как начальную стадию гипертрофии, в Угличском – конечную стадию мезотрофии. Полученные результаты могут быть использованы при оценке и прогнозировании биопродуктивности водоемов.

**Таблица 6.** Показатели содержания растительных пигментов в донных отложениях Ивановского и Углицкого водохранилищ в 2019 г.

Показатель	Ивановское водохранилище		Углицкое водохранилище	
	среднее ± ошибка	$C_v$	среднее ± ошибка	$C_v$
Хл, мкг/г с.о.	47.6 ± 18.5	145	25.3 ± 4.7	70
Хл + Ф, мкг/г с.о.	156.5 ± 48.0	115	105.4 ± 17.6	62
Хл + Ф, мг/(м <sup>2</sup> мм)	53.0 ± 12.2	86	33.9 ± 3.4	38
Ф, %	71.6 ± 2.6	13	76.6 ± 1.3	6
$E_{480}/E_{665}$	2.07 ± 0.09	16	2.33 ± 0.12	20
$E_{480}/E_{665к}$	1.45 ± 0.05	12	1.59 ± 0.07	17

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Винберг Г.Г.* 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Григорьева И.Л., Ланцова И.В., Тулякова Г.В.* 2000. Геоэкология Ивановского водохранилища и его водосбора. Конаково: Издательский дом "Булат".
- Даценко Ю.С.* 2007. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. Москва: ГЕОС.
- Девяткин В.Г.* 1975. Влияние подогретых вод на фитопланктон Ивановского водохранилища // Экология организмов водохранилищ-охладителей. Ленинград: Наука. С. 143.
- Девяткин В.Г., Метелева Н.Ю., Митропольская И.В.* 2000. Гидрофизические факторы продуктивности литорального фитопланктона: влияние гидрофизических факторов на динамику фотосинтеза фитопланктона // Биология внутренних вод. № 1. С. 45.
- Законнов В.В., Гершевский П., Законнова А.В., Кашубский М.* 2016. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 3. Оценка изменения морфометрических характеристик в результате накопления донных отложений в Углицком водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 6. С. 61.
- Законнов В.В., Григорьева И.Л., Законнова А.В.* 2018. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 5. Донные отложения и качество воды Ивановского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 3. С. 35.
- Законнова А.В., Литвинов А.С.* 2016. Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Тр. Института биол. внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 75(78). С. 16.
- Ивановское водохранилище и его жизнь. 1978. Ленинград: Наука.
- Лазарева В.И., Соколова Е.А.* 2013. Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современной биологии. Т. 133. № 6. С. 564.
- Литвинов А.С., Пырина И.Л., Законнова А.В.* 2014. Термический режим и продуктивность фитопланктона Рыбинского водохранилища в условиях изменения климата // Вода: химия и экология. № 12. С. 108.
- Мартынова М.В.* 2010. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. Москва: Наука.
- Пырина И.Л.* 1966. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов // Продукцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах. Москва: Изд-во АН СССР. С. 249.
- Пырина И.Л., Девяткин В.Г., Елизарова В.А.* 1975. Экспериментальное изучение влияния подогрева на развитие и фотосинтез фитопланктона // Антропогенные факторы в жизни водоемов. Труды ИБВВ АН СССР. Вып. 30(33). Ленинград: Наука. С. 67.
- Пырина И.Л., Ляшенко Г.Ф.* 2005. Многолетняя динамика продуктивности фитопланктона и высшей водной растительности и их роль в продуцировании органического вещества в зарастающем Ивановском водохранилище // Биология внутренних вод. № 3. С. 48.
- Пырина И.Л., Литвинов А.С., Кучай Л.А. и др.* 2006. Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона Рыбинского водохранилища в связи с действием климатических факторов // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. Москва: Товарищество науч. изданий КМК. С. 38.
- Сигарева Л.Е.* 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: Тов-во науч. изданий КМК.
- 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.
- Экологические проблемы Верхней Волги. 2001. Ярославль: Изд-во Ярослав. гос. техн. ун-та.
- Alimov A.F., Golubkov M.S.* 2014. Lake eutrophication and community structure // Intl. Water Biol. V. 7. № 3. P. 185.  
<https://doi.org/10.1134/S1995082914030031>
- Boulion V.V.* 2020. A system for assessing and forecasting the bioproductivity of lacustrine-type ecosystems // Water



- Resour. V. 47. № 3. P. 459.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807820030021>
- Edelstein K.K. 1995. Hydrology peculiarities of valley reservoirs // *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* V. 80. № 1. P. 27.  
<https://doi.org/10.1002/iroh.19950800105>
- Jeppesen E., Brucet S., Naselli-Flores L. et al. 2015. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity // *Hydrobiologia.* V. 750. № 1. P. 201.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>
- Jiménez L., Romero-Viana L., Conde-Porcuna J.M., Pérez-Martínez C. 2015. Sedimentary photosynthetic pigments as indicators of climate and watershed perturbations in an alpine lake in southern Spain // *Limnetica.* V. 34. № 2. P. 439. <https://www.researchgate.net/publication/289532907>
- Kopylov A.I., Lazareva V.I., Mineeva N.M., Zobotkina E.A. 2020. Planktonic community of a large eutrophic reservoir during a period of anomalously high water temperature // *Inland Water Biol.* V. 13. № 3. P. 339.  
<https://doi.org/10.1134/S1995082920030086>
- Leavitt P.R. 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // *J. Paleolimnol.* № 9. 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>
- Mineeva N.M. 2019. Content of photosynthetic pigments in the Upper Volga reservoirs (2005–2016) // *Inland Water Biol.* V. 12. № 2. P. 161.  
<https://doi.org/10.1134/S199508291902010X>
- 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>
- Poddubnyi S.A., Papchenkov V.G., Chemeris E.V., Bobrov A.A. 2017. Overgrowing of protected shallow waters in the Upper Volga reservoirs in relation to their morphometry // *Inland Water Biol.* V. 10. № 1. P. 64.  
<https://doi.org/10.1134/S199508291701014X>
- Reuss N., Leavitt P.R., Hall R.I. et al. 2010. Development and application of sedimentary pigments for assessing effects of climatic and environmental changes on subarctic lakes in northern Sweden // *J. Paleolimnol.* V. 43. № 1. P. 149.  
<https://doi.org/10.1007/s10933-009-9323-x>
- Sigareva L.E., Perova S.N., Timofeeva N.A. 2020. Long-term dynamics of the macrozoobenthos and plant pigments in bottom sediments of Rybinsk Reservoir // *Biol. Bull.* V. 47. № 1. P. 80.  
<https://doi.org/10.1134/S1062359020010136>
- 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>
- Szymczak-Żyła M., Kowalewska G., Louda J.W. 2011. Chlorophyll-*a* and derivatives in recent sediments as indicators of productivity and depositional conditions // *Mar. Chem.* V. 125. № 1–4. P. 39.  
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.02.002>
- Tse T.J., Doig L.E., Leavitt P.R. et al. 2015. Long-term spatial trends in sedimentary algal pigments in a narrow river-valley reservoir, Lake Diefenbaker, Canada // *J. Great Lakes Res.* V. 41. Suppl. 2. P. 56.  
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.08.002>

## Modern Trophic State of Benthos in Ivankovo and Uglich Reservoirs on the Content of Sedimentary Pigments

L. E. Sigareva<sup>1,\*</sup>, N. A. Timofeeva<sup>1</sup>, and R. A. Lozhkina<sup>1</sup>

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

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

New data on the content of chlorophyll *a* with pheopigments (Chl + Ph) in bottom sediments (BSs) of the Ivankovo and Uglich reservoirs of the Upper Volga (Russia) obtained in 2019 are given. The relationships between pigment concentrations and characteristics of bottom sediments and depth are analyzed. It was established that at present the average concentration of Chl + Ph was 156 µg/g dry sediment in the Ivankovo and 105 in the Uglich reservoirs and exceeded the values of 20 years ago (126 and 79 µg/g dry sediment respectively). An increase in the concentration of sedimentary pigments was noted mainly in zones of silt accumulation. The average content of sedimentary pigments calculated taking into account the areas of different types of sediments gives grounds to estimate the trophic state of benthos in the Ivankovo reservoir (125 µg/g of dry sediment) as the initial stage of hypertrophy and in Uglich reservoir (52.8 µg/g of dry sediment) as the final stage of mesotrophy. The trophic state of benthos in both water bodies is consistent with the eutrophic status of the pelagial.

**Keywords:** chlorophyll *a*, pheopigments, bottom sediments, trophic state, Ivankovo reservoir, Uglich reservoir