

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

© 2025 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 12.03.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 28.04.2024 г.

Получены данные по содержанию растительных пигментов в донных отложениях (ДО) водохранилищ р. Волги в летний период 2015–2021 гг. Показано, что продукционные свойства бентали не изменились по сравнению с таковыми в конце XX в. Концентрации хлорофилла *a* и продуктов его деградации – феопигментов в верхнем 5-сантиметровом слое ДО уменьшаются от Верхней к Нижней Волге, за исключением Чебоксарского водохранилища с высокими значениями пигментных показателей. Пространственная динамика пигментов в ДО зависит от морфометрии водохранилищ и гидродинамической активности, влияющей на распределение грунтов. Концентрации осадочных пигментов положительно связаны с содержанием органического вещества, влажностью ДО, суммарным вкладом алевритовой и пелитовой фракций, отрицательно – со скоростью течения, средним диаметром частиц и объемной массой грунта. Показано ослабление связи пигментов с глубиной в водохранилищах нижней части каскада. Временные изменения содержания осадочных пигментов в водохранилищах за исследуемый период не выявлены. Согласно средним концентрациям пигментов, трофическое состояние бентали Иваньковского водохранилища характеризуется как гипертрофное, Угличского, Рыбинского, Горьковского, Чебоксарского – эвтрофное, Куйбышевского, Саратовского, Волгоградского – мезотрофное, незарегулированной Волги – олиготрофное. Содержание осадочных пигментов в пересчете на условную биомассу водорослей представлено незначительной частью (0.24–0.86%) первичной продукции фитопланктона – основного продуцента органического вещества в водохранилищах р. Волги.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, феопигменты, донные отложения, трофическое состояние, водохранилища, р. Волга

DOI: 10.31857/S0320965225010028, **EDN:** CFYTRY

ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений современной продукционной гидроэкологии – изучение растительных пигментов как показателей трофического состояния водоемов в условиях изменения климата (Шимареева и др., 2017; Burge et al., 2018; Bernát et al., 2020; Hofmann et al., 2021). Представления о продуктивности экосистемы по содержанию растительных пигментов основаны на понимании закономерностей их распределения во времени и пространстве в зависимости от комплекса биотических и абиотических факторов (Cochrane et al., 2009; Zabaleta et al., 2021; Теканова др., 2023; Guimarães, Neto, 2023). Основная часть

исследований осадочных пигментов проведена на озерах (Trifonova, Davydova, 1983; Leavitt, 1993; Leavitt, Findlay, 1994; Reuss et al., 2010; Buchaca et al., 2019; Makri et al., 2019; Gushulak et al., 2021). Первые сведения о содержании растительных пигментов в ДО водохранилищ р. Волги были получены эпизодически в разные годы, что затрудняет сравнительный анализ и обобщение результатов (Номоконова, 1989; Сигарева и др., 2016; Сигарева, Тимофеева, 2018). Возможности использования осадочных пигментов в экологическом мониторинге водохранилищ даны в ряде публикаций (Сигарева, 2012; Tse et al., 2015; Waters et al., 2015; Gangi et al., 2020; Cardoso-Silva et al., 2022). Фотосинтетические пигменты в донных отложениях представлены тем же составом, что и в водной толще, но при высоком вкладе деградированных форм, особенно в афотической

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

зоне. Количественные связи осадочных пигментов с продукционными и деструкционными процессами в водоемах почти не выявлены. Недостаточная изученность продукционных свойств донного яруса – одна из главных причин необходимости проведения сравнительных исследований осадочных пигментов в разнотипных водных экосистемах для выяснения и прогнозирования природных изменений в современную эпоху глобального потепления.

Цель работы – проанализировать многолетние временные и пространственные тренды содержания растительных пигментов в ДО каскада волжских водохранилищ и на основе пигментных характеристик установить трофическое состояние бентали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы получены в комплексных экспедициях Института биологии внутренних вод РАН по волжскому каскаду водохранилищ с 2015 по 2021 гг. Пробы ($n = 937$) собраны из верхнего 5-сантиметрового слоя ДО модифицированным дночертателем Экмана–Берджа (ДАК-250, Россия) на станциях восьми водохранилищ р. Волги и ее незарегулированной части. Растительные пигменты в ДО анализировали спектрофотометрическим методом в 90%-ном ацетоновом экстракте на спектрофотометре Lambda 25 (Perkin Elmer, США).

Концентрации пигментов (Хл + Ф) рассчитывали по уравнениям Лоренциена (Lorenzen, 1967). В работе использовали содержание Хл + Ф в сухом осадке ДО (мкг/г), в органическом веществе ДО (мг/г ОВ), а также в пересчете на 1 м² грунта естественной влажности толщиной 1 мм (мг/(м² × мм)). Влажность грунта определяли после высушивания проб при температуре 60°C. Воздушно-сухую объемную массу грунта рассчитывали по формуле (Сигарева, 2012). Трофическое состояние бентали по концентрации Хл + Ф в ДО оценивали по шкале (Möller, Scharf, 1986): <13 мкг/г с.о. – олиготрофная, 13–60 – мезотрофная, 60–120 – эвтрофная, >120 – гипертрофная. Первичная продукция фитопланктона волжских водохранилищ за год рассчитана на основе среднесуточных значений в период открытой воды (Минеева, 2009). Степень утилизации первичной продукции ОВ в экосистеме оценивали путем пересчета среднегодовой концентрации Хл + Ф в ДО в углерод условной биомассы водорослей, т. е. биомассы фитопланктона, соответствующей концентрации пигментов. Полученную величину оценивали в процентах к годовой первичной продукции, выраженной в единицах углерода, при использовании известных коэффициентов пересчета между Хл, ОВ и С (Сигарева, 2012). Статистический анализ выполняли с помощью пакетов программ MS

Excel и Statistica v. 8.0. Достоверность результатов оценивали для $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохранилища волжского каскада различаются основными абиотическими и климатическими параметрами (интенсивностью падающей на поверхность воды солнечной радиации, температурой воды и концентрацией элементов минерального питания), связанными со сменой климатических условий в природных зонах бассейна р. Волги. В период наблюдений температура, цветность и прозрачность воды были близкими к характерным значениям соответствующих показателей для волжских водохранилищ в летний период (Минеева и др., 2025). В водохранилищах нижней части каскада увеличиваются глубина водной толщи и прозрачность воды, а также уменьшается цветность (табл. 1). Содержание кислорода в воде чаще всего превышает порог насыщения, распределяется по глубине равномерно, и только в отдельных местах в нижних слоях воды отмечено существенное уменьшение его концентрации (Лазарева и др., 2018).

Показатели илонакопления и осадкообразования в целом по каскаду отражают возрастание массы и толщины вторичных отложений от водохранилищ Верхней Волги к Средней и Нижней (Законнов, Законнова, 2008). В каждом водохранилище отмечено возрастание интенсивности осадконакопления от места выклинивания подпора к плотине, а также в направлении от речных участков к озеровидным. Площади дна в водохранилищах заняты преимущественно крупнозернистыми наносами, в меньшей степени – тонкодисперсными отложениями и трансформированными грунтами (рис. 1). Повышенным вкладом крупнозернистых наносов выделяется

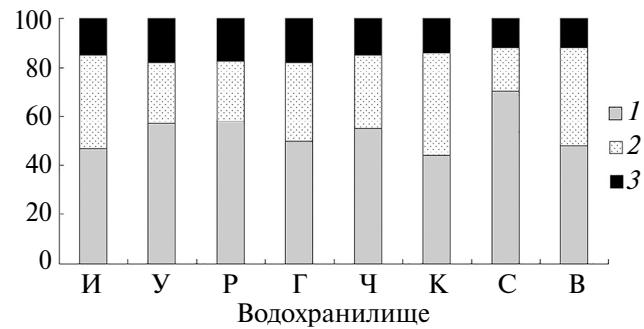


Рис. 1. Соотношение площадей грунтов (%) в волжских водохранилищах по данным грунтовых съемок 1992–2016 гг. 1 – крупнозернистые наносы, 2 – тонкодисперсные отложения, 3 – трансформированные грунты. Здесь и на рис. 2, И – Иваньковское, У – Угличское, Р – Рыбинское, Г – Горьковское, Ч – Чебоксарское, К – Куйбышевское, С – Саратовское, В – Волгоградское водохранилища.

Таблица 1. Основные абиотические характеристики волжских водохранилищ

Вдхр.	S_1	S_2	H	K	СР	Пр	Цв	O_2	БП
И	41	287	3.8	7.9	2764	86	54	86	214
У	60	226	5.4	9.8	—	87	57	86	207
Р	150	4480	5.6	1.4	2686	118	60	85	195
Г	229	1509	5.7	6.0	2887	118	52	89	202
Ч	595	1200	4.3	24.3	2994	116	44	82	212
К	1180	5870	9.6	4.2	3302	149	37	88	203
С	1290	1833	6.5	19.7	3395	216	35	91	232
В	1340	3248	8.6	8.0	3510	184	34	96	251

Примечание. Здесь и в табл. 2–5, И – Иваньковское; У – Угличское; Р – Рыбинское; Г – Горьковское; Ч – Чебоксарское; К – Куйбышевское; С – Саратовское; В – Волгоградское водохранилища; S_1 – площадь водосбора, тыс. км²; S_2 – площадь зеркала, км²; H – средняя глубина, м; K – коэффициент водообмена, год⁻¹; СР – солнечная радиация, МДж/м²(V–IX); Пр – прозрачность, см; Цв – цветность, град.; O_2 – кислород, % насыщения; БП – беззедный период, сут; “–” – данные отсутствуют; данные в столбцах 2, 6–10 даны по: (Пивоварова, Стадник, 1988; Минеева, 2009; Минеева и др., 2025); в столбцах 3–5 – данные В.В. Законнова (неопубликованные).

Саратовское водохранилище. Донные отложения на станциях в годы исследования (2015–2021) были типичными для волжских водохранилищ (Законнов, Законнова, 2008; Сигарева, 2012). Основные типы грунтов: песок и илистый песок (иногда с гравием), а также илы – песчанистый, серый глинистый, бурый, торфогеный и торфянистый. Для мелководной зоны всего каскада характерно наличие песков и трансформированных грунтов, а также отложений из макрофитов, для русловых ложбин Верхней Волги – серых глинистых илов, для русла Средней и Нижней Волги – бурых и серых илов. В болотистых мелководьях и на глубоких периферических участках Верхней Волги встречаются торфогенные и торфянистые илы.

Содержание ОВ в ДО уменьшается вниз по течению р. Волги. Среднее относительное количество ОВ в водохранилищах Верхней Волги составляет 10–13%, Средней Волги – 6–9%, Нижней Волги – 4–6%, на незарегулированном участке – 1% (табл. 2). Повышенным содержанием ОВ характеризуются илы: 12–16, 11–14, 9 и 5% соответственно (табл. 3).

Осадочные пигменты в ДО водохранилищ в афотической зоне преимущественно представлены продуктами деградации хлорофилла – феопигментами. Вклад феопигментов в сумму Хл + Ф в Иваньковском водохранилище составляет $74.4 \pm 0.9\%$, Угличском – 78.8 ± 0.8 , Рыбинском – 81.2 ± 0.6 , Горьковском – 81.9 ± 1.0 , Чебоксарском – 83.3 ± 1.4 , Куйбышевском – 87.8 ± 0.8 , Саратовском – 82.5 ± 3.2 , Волгоградском – 90.5 ± 1.1 , на незарегулированном участке – $78.0 \pm 3.8\%$. Среднее для всего каскада относительное содержание Ф ($82.3 \pm 0.5\%$) характеризуется незначительной вариабельностью ($C_v = 16.8\%$, $n = 937$). Минимальная доля дериватов хлорофилла выявлена в Иваньковском водохранилище, максимальная – в Волгоградском.

Низкие концентрации Хл + Ф (<1 мкг/г с.о.) отмечены в песках Средней и Нижней Волги, высокие (>800 мкг/г с.о.) – в илах Верхней Волги (табл. 2). Максимальные концентрации Хл + Ф во всех водохранилищах относятся к гипертрофной категории (табл. 2). По абсолютным значениям максимумов лидирует Верхняя Волга, по минимальным величинам – Нижняя Волга.

Средние концентрации пигментов в ДО водохранилищ снижаются вниз по каскаду от величин гипертрофной категории (в Иваньковском) к эвтрофным (в Угличском, Рыбинском, Горьковском, Чебоксарском), мезотрофным (в Куйбышевском, Саратовском, Волгоградском) и олиготрофным на незарегулированной Волге (табл. 2). С этой оценкой в большинстве водоемов совпадают категории трофии ДО, выделенные по содержанию пигментов в илах (табл. 3). Исключение составляет Чебоксарское водохранилище, в котором концентрация осадочных пигментов заметно увеличивается на фоне пониженных значений в сопредельных Горьковском и Куйбышевском водохранилищах. Концентрация пигментов в илах незарегулированной Нижней Волги относится к мезотрофной категории (табл. 3). Такая тенденция сохраняется при типизации водохранилищ по содержанию пигментов в расчете на единицу ОВ, а также на единицу площади грунтов (табл. 2, 3).

На долю величин, соответствующих олиготрофной, мезотрофной, эвтрофной и гипертрофной категориям, в среднем приходится 33.9, 34.1, 15.7 и 16.2% всего числа полученных данных (суммы данных всех категорий) соответственно (табл. 4). Следовательно, вклады олиготрофных и мезотрофных категорий Хл + Ф в каскаде превышают таковые эвтрофных и гипертрофных категорий почти в два раза. В пространственном аспекте прослеживается уменьшение вклада

Таблица 2. Содержание осадочных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги в 2015–2021 гг.

Вдхр.	n	Трофический статус	Хл + Ф			OB, %
			мкг/г с.о.	мг/г ОВ	мг/(м ² × мм)	
И	72	гипертрофный	1.3–855 (125) 140 ± 20.8	0.04–7.0 (83) 1.17 ± 0.11	2.1–182 (74) 43.0 ± 3.8	0.4–34.5 (75) 10.7 ± 1.0
			2.6–240 (77) 77.3 ± 7.1	0.07–1.7 (43) 0.79 ± 0.04	3.8–77.7 (50) 30.5 ± 1.8	0.3–43.0 (66) 9.7 ± 0.8
У	71	эвтрофный	0.4–597 (106) 76.5 ± 5.4	0.03–1.88 (51) 0.54 ± 0.02	0.6–99.0 (53) 24.5 ± 0.9	0.4–50.0 (82) 12.8 ± 0.7
			0.1–270 (100) 63.6 ± 5.1	0.01–3.72 (79) 0.63 ± 0.04	0.2–64.0 (57) 19.8 ± 0.9	0.3–36.6 (78) 9.3 ± 0.6
Р	228	эвтрофный	0.1–839 (164) 105 ± 18.6	0.002–6.04 (105) 1.35 ± 0.15	0.2–330 (147) 45.7 ± 7.3	0.1–18.0 (90) 6.4 ± 0.6
			0.2–186 (72) 41.8 ± 2.7	0.01–1.6 (54) 0.48 ± 0.02	0.2–186 (72) 41.8 ± 2.7	0.1–19.6 (55) 9.0 ± 0.4
Г	154	эвтрофный	0.0–128 (129) 21.6 ± 3.6	0.0–1.20 (90) 0.35 ± 0.04	0.0–47.0 (114) 10.6 ± 1.5	0.1–14.2 (99) 4.5 ± 0.6
			0.1–243 (128) 37.7 ± 5.4	0.01–2.30 (100) 0.47 ± 0.05	0.1–86.5 (113) 14.8 ± 1.9	0.3–14.4 (71) 6.2 ± 0.5
Ч	86	эвтрофный	0.0–235 (350) 9.0 ± 4.1	0.0–3.02 (165) 0.31 ± 0.07	0.0–133.0 (233) 8.5 ± 2.6	0.1–7.8 (117) 1.3 ± 0.2
НВ	59	олиготрофный				

Примечание. Здесь и в табл. 3–5, НВ – незарегулированная Волга; n – число данных; над чертой – пределы, под чертой – среднее со стандартной ошибкой; в скобках – коэффициент вариации, C_v, %.

Таблица 3. Содержание осадочных пигментов в илах водохранилищ Волги в 2015–2021 гг.

Вдхр.	n	Трофический статус	Хл + Ф			OB, %
			мкг/г с.о.	мг/г ОВ	мг/(м ² × мм)	
И	50	гипертрофный	195 ± 26.5 (95)	1.33 ± 0.16 (82)	53.9 ± 4.6 (59)	14.5 ± 1.0 (47)
У	57	эвтрофный	93.6 ± 7.4 (59)	0.83 ± 0.05 (41)	34.4 ± 1.8 (40)	11.5 ± 0.8 (51)
Р	170	эвтрофный	98.7 ± 6.3 (83)	0.59 ± 0.02 (45)	29.0 ± 0.9 (39)	16.0 ± 0.8 (63)
Г	99	эвтрофный	94.3 ± 6.1 (64)	0.69 ± 0.03 (48)	25.4 ± 0.8 (33)	13.5 ± 0.6 (41)
Ч	46	гипертрофный	189 ± 29.7 (106)	1.75 ± 0.25 (94)	76.2 ± 11.9 (104)	10.8 ± 0.05 (34)
К	101	мезотрофный	50.4 ± 2.7 (53)	0.49 ± 0.02 (47)	20.2 ± 0.9 (46)	10.9 ± 0.4 (33)
С	28	мезотрофный	44.5 ± 5.1 (60)	0.51 ± 0.05 (50)	20.1 ± 2.1 (56)	8.8 ± 0.6 (33)
В	53	мезотрофный	55.8 ± 6.9 (90)	0.62 ± 0.07 (81)	21.0 ± 2.4 (82)	8.9 ± 0.3 (27)
НВ	7	мезотрофный	49.1 ± 33.6 (168)	0.85 ± 0.40 (115)	37.4 ± 17.3 (113)	4.5 ± 0.7 (39)

Примечание. Даны средние значения со стандартной ошибкой, n – число данных; в скобках – коэффициент вариации, %.

Таблица 4. Распределение концентраций осадочных пигментов (мкг/г с.о.) по категориям трофии в водохранилищах р. Волги в 2015–2021 гг.

Вдхр.	Олиготрофная		Мезотрофная		Эвтрофная		Гипертрофная	
	I	II	I	II	I	II	I	II
И	18	7.3 ± 0.9	25	33.1 ± 3.0	22	86.8 ± 4.1	35	321 ± 39.0
У	14	7.3 ± 1.2	34	36.3 ± 3.4	24	81.0 ± 3.0	28	158 ± 7.0
Р	17	5.6 ± 0.6	42	33.5 ± 1.4	15	85.3 ± 3.1	26	187 ± 10.2
Г	30	4.5 ± 0.6	29	33.2 ± 2.2	21	93.0 ± 2.7	19	168 ± 7.6
Ч	37	3.1 ± 0.7	17	32.1 ± 3.9	20	86.6 ± 4.2	26	316 ± 49.8
К	18	4.1 ± 1.0	60	38.6 ± 1.5	20	76.2 ± 2.5	2	166 ± 27.7
С	53	1.6 ± 0.5	37	33.2 ± 2.3	8	78.0 ± 6.3	2	128 ± 0.0
В	35	1.8 ± 0.5	48	34.7 ± 2.4	11	77.9 ± 5.6	6	189 ± 21.7
НВ	83	1.6 ± 0.4	15	24.0 ± 3.6	–	–	2	235 ± 0.0

Примечание. I – частота встречаемости, %; II – среднее со стандартной ошибкой; “–” – данные отсутствуют.

концентраций пигментов эвтрофной и гипертрофной категорий и увеличение олиготрофной от Верхней Волги к Нижней (табл. 4).

Нисходящий тренд концентраций Хл + Ф от Верхней Волги к Нижней наиболее четко прослеживался в 2015 и 2016 гг. (рис. 2). В последующие пять лет (2017–2021) этот тренд нарушался существенным увеличением концентрации пигментов в Чебоксарском водохранилище. В этом водохранилище наиболее четко выражены временные различия содержания пигментов в расчете на 1 г ОВ (рис. 2). Пространственная динамика концентрации пигментов в летний период повторялась в каскаде каждый год.

Содержание растительных пигментов в ДО зависит от ряда биотических и абиотических факторов. Установлены положительные связи Хл + Ф с концентрацией ОВ, влажностью грунтов, суммарным количеством алевритовой и пелитовой фракций, а также отрицательные связи со скоростью течения, воздушно-сухой объемной массой и средним диаметром частиц грунта. Выявленные

зависимости характеризуются высокими коэффициентами детерминации (рис. 3).

Связь растительных пигментов в ДО с глубиной неоднозначна (табл. 5), для большинства водохранилищ она характеризовалась невысокими, но достоверными коэффициентами корреляции. В отдельных водохранилищах Верхней и Средней Волги эта связь была достаточно сильной. Коэффициент корреляции между средними концентрациями Хл + Ф и средней глубиной станций (без участка незарегулированной Волги) достигает величины –0.81. Отрицательный характер связи обусловлен снижением содержания пигментов вниз по каскаду с параллельным увеличением глубины на Средней и Нижней Волге (табл. 2, 5). Рассматриваемая зависимость ослабевает в Чебоксарском и Саратовском водохранилищах, а в Куйбышевском и Волгоградском связь становится недостоверной. На участке незарегулированной Волги тоже отсутствует связь пигментов с глубиной.

В многолетнем аспекте (с 2015 по 2021 гг.) концентрации Хл + Ф в верхнем слое ДО,

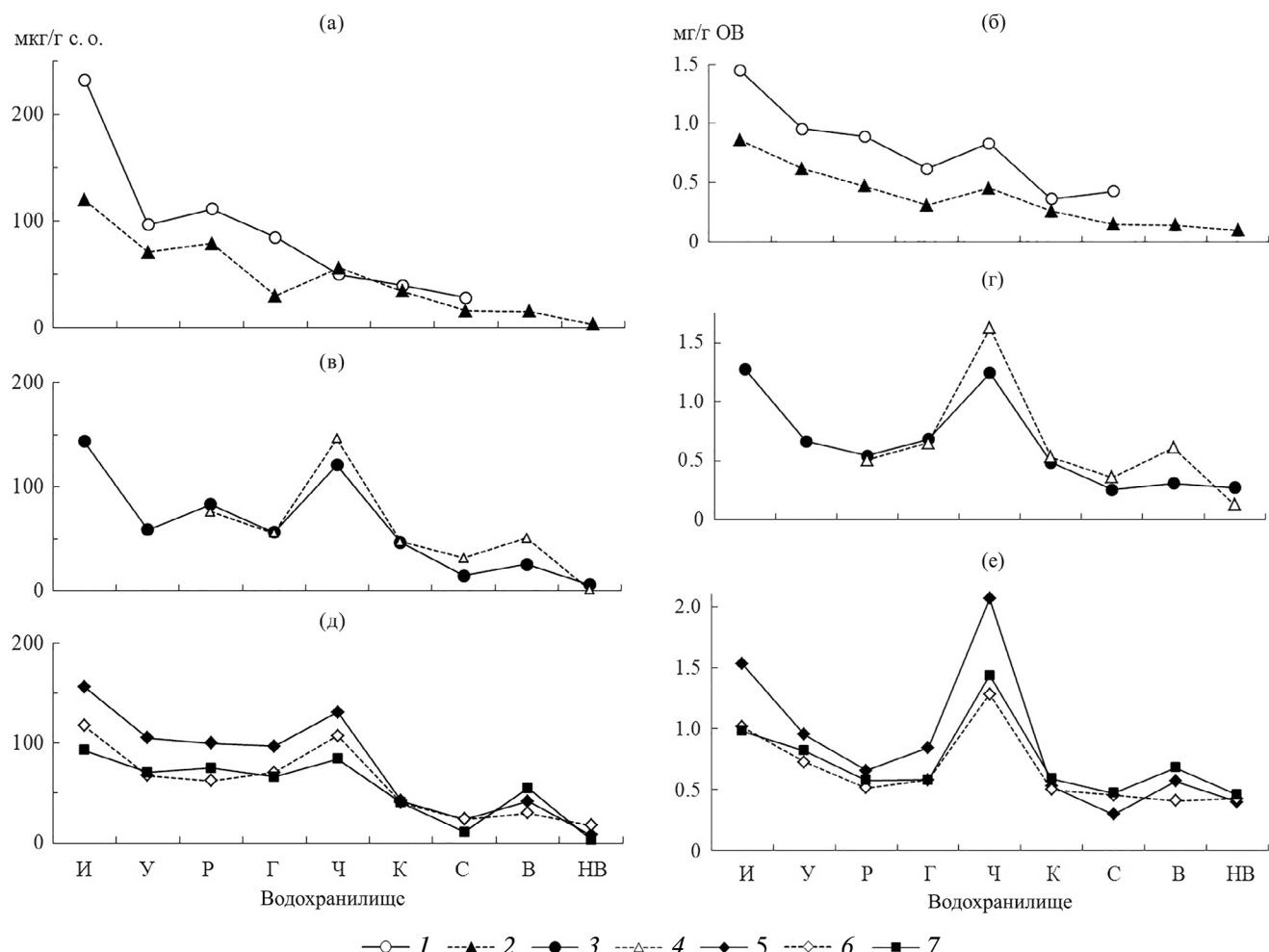


Рис. 2. Среднее содержание Хл + Ф (мкг/г с.о.) (а, в, д) и Хл + Ф (мг/г ОВ) (б, г, е) в ДО водохранилищ р. Волги в разные годы наблюдений. 1 – 2015, 2 – 2016, 3 – 2017, 4 – 2019, 5 – 2020, 7 – 2021 г.

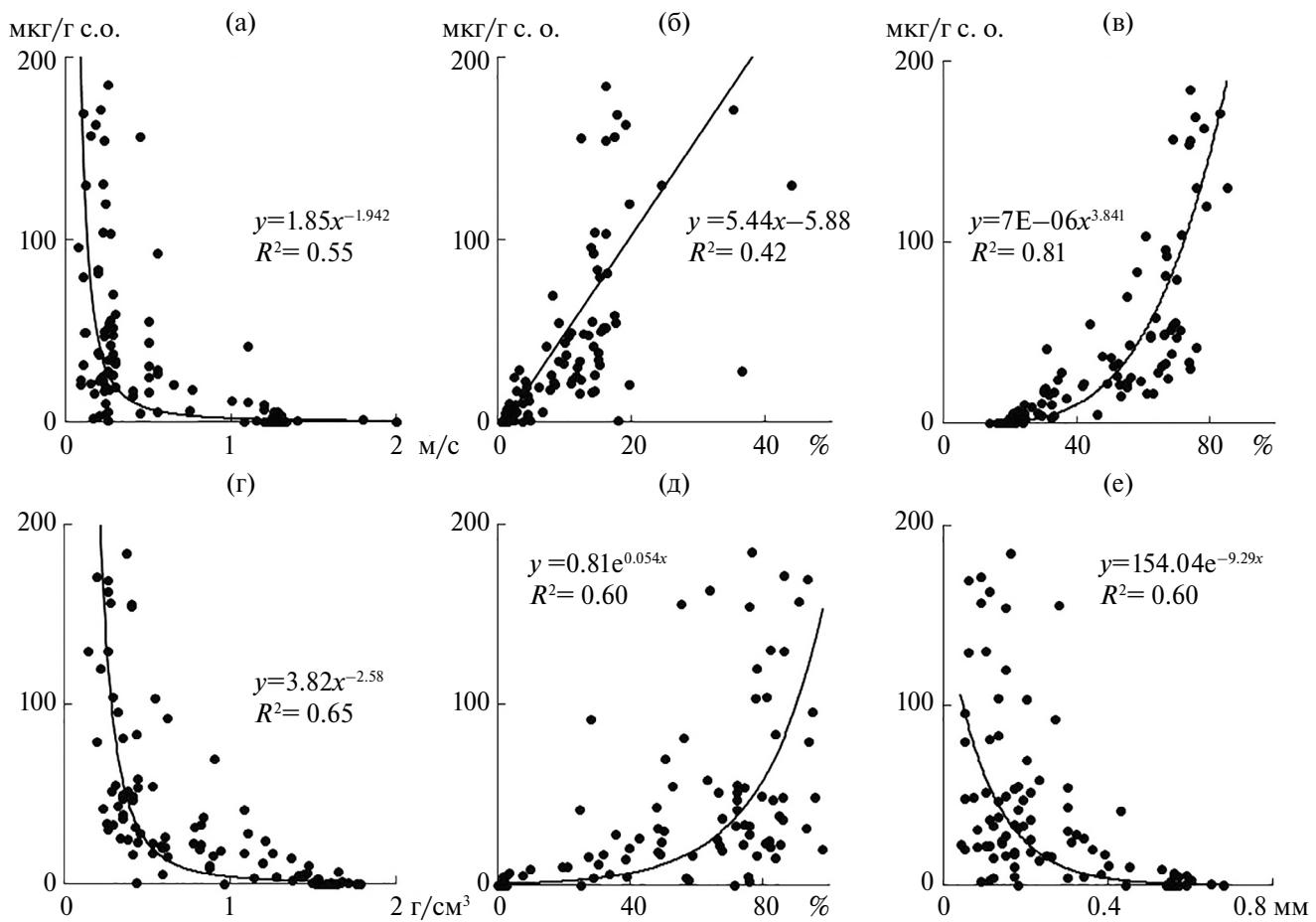


Рис. 3. Связь содержания осадочных пигментов (мкг/г с.о.) со скоростью течения (а) и характеристиками ДО: концентрацией ОВ (б), % с.о., влажностью (в), сухой объемной массой (г), содержанием суммарной алевритовой и пелитовой фракции (д) и средним диаметром частиц (е) по данным 2016 г. ($n = 108$).

Таблица 5. Коэффициенты корреляции ($p < 0.05$) концентрации осадочных пигментов (мкг/г с.о.) с глубиной и характеристиками ДО водохранилищ р. Волги (2015–2021 гг.)

Вдхр.	СГ	Коэффициенты корреляции			
		Г	В	ОМ	ОВ
И	8.7 ± 0.6	0.68	0.71	-0.64	0.70
У	9.6 ± 0.6	0.50	0.80	-0.77	0.56
Р	9.1 ± 0.4	0.52	0.79	-0.73	0.80
Г	9.8 ± 0.5	0.53	0.86	-0.80	0.80
Ч	9.9 ± 0.6	-0.27	0.57	-0.56	0.54
К	15.9 ± 0.6	—	0.74	-0.71	0.66
С	14.7 ± 0.8	0.32	0.74	-0.74	0.80
В	14.4 ± 0.8	—	0.62	-0.58	0.57
НВ	8.4 ± 0.6	—	0.75	-0.63	0.73

Примечание. СГ – средняя глубина для станций наблюдения со стандартной ошибкой, м; Г – глубина, м; В – влажность, %; ОМ – объемная масса, г/см³; ОВ – органическое вещество, %; число данных, как в табл. 2, “–” – корреляция отсутствует.

сгруппированные по участкам р. Волги, изменяются без четкого тренда (рис. 4). Повышенные величины отмечены на Верхней Волге в 2015 г., на Средней Волге – в 2017–2019 гг., на Нижней Волге – в 2018, 2019 и 2021 гг. Низкие концентрации получены в 2016 г. на Средней и Нижней Волге.

Расчетная условная биомасса водорослей в среднегодовом слое отложений составила в Иваньковском водохранилище 32.7 г/м², Угличском – 23.2, Рыбинском – 22.5, Горьковском – 17.4, Чебоксарском – 32.9, Куйбышевском – 26.8, Саратовском – 11.4, Волгоградском – 27.2. Порядок полученных величин сопоставим с таковым в водном столбе этих водохранилищ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Каскад волжских водохранилищ – одна из уникальных экосистем, протяженностью 2642 км, где проводят комплексные масштабные исследования (Законнов, Законнова, 2008; Лазарева и др., 2018; Структура..., 2018; Минеева и др., 2025). Каскад расположен в разных природных зонах – от южной

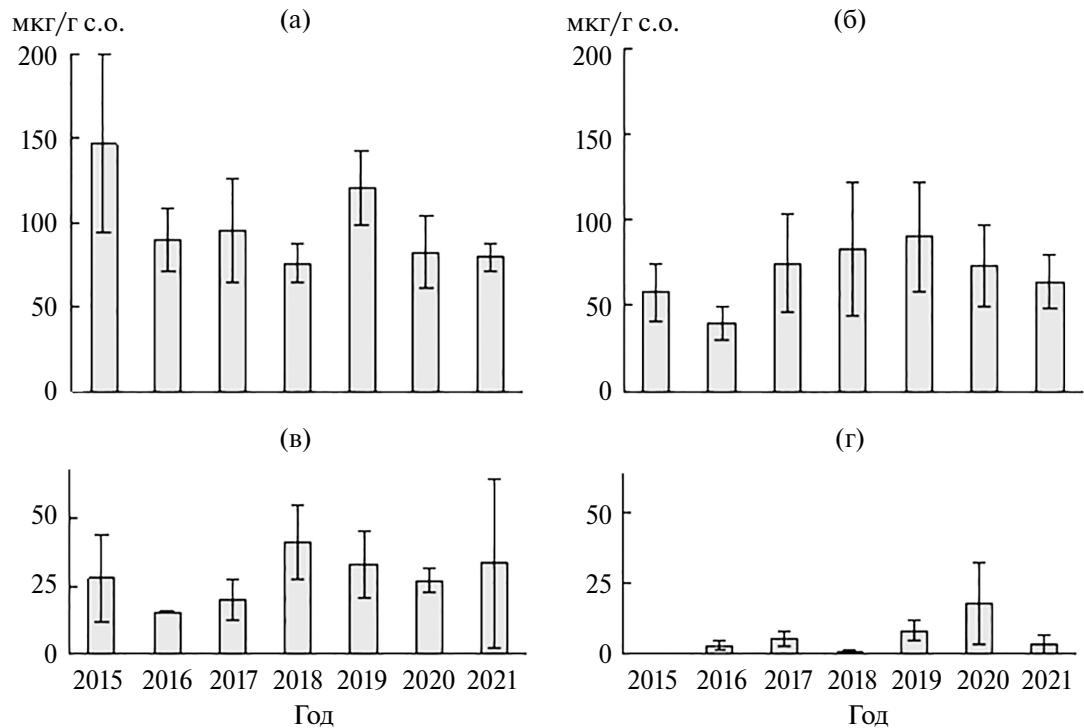


Рис. 4. Межгодовая динамика суммарной концентрации Хл + Ф (мкг/г с.о.) в верхнем слое донных отложений Верхней (а), Средней (б), Нижней (в) и незарегулированной (г) р. Волги (2015–2021 гг.).

тайги до полупустыни с широким диапазоном условий внешней среды. Это дает основание рассматривать волжские водохранилища в качестве модельной системы для решения ряда научных и практических задач: изучения пространственно-временной структуры и функционирования антропогенно нарушенных водных экосистем, оценки и прогнозирования их экологического состояния, оценки роли ДО в формировании продуктивности водоемов.

Многолетние исследования показывают, что в период современного потепления климата происходят различные изменения трофического состояния водных экосистем: эвтрофирование, деэвтрофирование, периодические колебания показателей продуктивности, а также отсутствие многолетних трендов (Alvarez-Cobelas et al., 2019; Теканова и др., 2023; Александров, 2024; Goncharov et al., 2024). Основными факторами, определяющими динамику трофии, остаются интенсивность солнечной радиации, температура и содержание биогенных элементов (Шимараева и др., 2017; Alvarez-Cobelas et al., 2019; Казанцева, Адамович, 2022).

Результаты многолетних исследований растительных пигментов в ДО водохранилищ р. Волги дополняют представления о продукционных свойствах бентали и их пространственно-временной динамике в условиях глобального потепления. Трофические критерии бентали, оцененные по

встречаемости показателей содержания осадочных пигментов, соответствуют в основном олиготрофной и мезотрофной категориям, в меньшей мере – эвтрофной и гипертрофной. Трофия бентосных биотопов водохранилищ снижается от Верхней Волги к Нижней. Тренд понижения нарушается увеличением трофии Чебоксарского водохранилища, испытывающего существенную антропогенную нагрузку за счет поступления крупных притоков р. Волги – рек Оки и Суры, а также за счет развития промышленности и коммунального хозяйства мегаполисов. О высокой потенциальной продуктивности Чебоксарского водохранилища свидетельствуют концентрации общего азота (1.32 мг/л) и фосфора (139 мкг/л) в воде, а также показатель антропогенной нагрузки (1.99), превышающие таковые в других волжских водохранилищах. При этом концентрация элементов минерального питания во всех волжских водохранилищах соответствует эвтрофному типу и не лимитирует развитие планктональных водорослей (Минеева, 2009).

Концентрации Хл + Ф в верхнем слое ДО в волжском каскаде в 2015–2021 гг. близки к полученным в конце XX в., и временной тренд за весь период наблюдений почти не выражен (рис. 4), как и по хлорофиллу в фитопланктоне всего каскада и отдельных водохранилищ (Структура..., 2018; Минеева и др., 2025). Только в Иваньковском водохранилище содержание пигментов стало

заметно выше, чем в предшествующий период: в 1996–1998 гг. их концентрация (126 ± 18 мкг/г с.о.) соответствовала границе перехода между эвтрофной и гипертрофной категориями, в настоящее время – гипертрофной (табл. 2). Влияние факторов увеличения продуктивности ДО компенсируется причинами, сдерживающими эвтрофирование, к которым относится усиление гидродинамической активности, увеличение глубины, сезонное ослабление освещенности и снижение температуры. В итоге комплексного воздействия условий среды содержание пигментов изменяется несущественно, и среднегодовая продуктивность бентали конкретного водоема сохраняется в пределах одного трофического статуса длительное время.

Пространственное распределение производственных характеристик ДО в каскаде водохранилищ р. Волги выражено достаточно четко. Понижение продуктивности бентали в нижних водохранилищах в значительной степени связано с увеличением глубины и изменчивостью факторов фотосинтеза (освещенности и температуры) (табл. 1, 2). Улучшение световых условий в водном столбе вниз по каскаду (повышение суммарной солнечной радиации за безледный сезон, увеличение прозрачности, уменьшение цветности), а также увеличение температуры воздуха и воды приводят к активизации фотосинтеза. Однако с глубиной возрастает время оседания взвеси и ухудшается состояние фотосинтетических пигментов, поступающих на дно, за счет биологических и химических деструкционных процессов. Связь осадочных пигментов с глубиной зависит от гидродинамической активности, влияющей на седиментацию ОВ и размыв дна в водоеме (Сигарева, 2012; Сигарева, Тимофеева, 2018; Структура..., 2018). Усиление гидродинамики препятствует осаждению взвеси, что приводит к формированию зон дна с низкой продуктивностью, обедненных ОВ и пигментами. Скорость осадконакопления возрастает к южным водохранилищам каскада (Законнов, Законнова, 2008), и содержание пигментов уменьшается за счет повышенного вклада минеральной составляющей грунтов. Однако связь между осадочными пигментами и глубиной водного столба в волжских водохранилищах в целом для каскада отрицательная, поскольку увеличение глубины способствует разрушению пигментов в воде при интенсивных деструкционных процессах (Leavitt, 1993).

Зависимости содержания пигментов в отложениях волжских водохранилищ от абиотических факторов – морфометрии, динамической активности водных масс и структуры грунтового комплекса аналогичны таковым на других водных объектах: водохранилищах (Номоконова, 1989; Сигарева, 2012; Tse et al., 2015) и озерах (Swain, 1985; Ostrovsky, Yacobi, 1999; Сигарева и др., 2000; Buchaca, Catalan, 2007).

В период потепления климата бенталь р. Волги сохраняет в пространственном аспекте производственные особенности, обусловленные морфометрическими, климатическими, гидрофизическими и гидрохимическими параметрами. Характер пространственного распределения Хл + Ф в ДО волжского каскада в общих чертах согласуется с распределением хлорофилла в планктоне водохранилищ, что свидетельствует о связи пигментов в верхнем и нижнем ярусах экосистемы и подтверждает ведущую роль первичной продукции ОВ в функционировании экосистемы (Минеева, 2009). При этом концентрация пигментов в донных отложениях варьирует сильнее, чем в планктоне, что отражает неравномерность и неоднородность формирования структуры грунтового комплекса. Коэффициент вариации содержания Хл + Ф в ДО каскада достигает 164%, а на незарегулированной Волге – 350% (табл. 2).

Концентрация растительных пигментов в ДО глубоководной части водоемов может рассматриваться как индикатор остаточного количества новообразованного при фотосинтезе ОВ, а также как показатель утилизации первичной продукции ОВ в трофических цепях экосистемы (Сигарева, 2012). Очевидно, что количество Хл в воде и ДО должно быть связано с отношением интенсивности первичной продукции к деструкции ОВ. Экспериментальная оценка показала, что даже в одном водохранилище (например, Рыбинском) отношение суточной первичной продукции к деструкции варьирует чрезвычайно сильно – от 0.13 до 4.1 (Минеева, 2009). Кроме этого, деструкция в экосистеме возрастает за счет бактериальных процессов в донных отложениях, и из-за мозаичности грунтового комплекса интенсивность минерализации ОВ тоже изменяется многократно (Дзюбан, 2010). Использование пигментных характеристик воды и ДО может дать более общее представление о соотношении скоростей новообразования и деструкции ОВ за длительный промежуток времени.

Рассчитанное нами содержание углерода условной биомассы водорослей в ДО волжских водохранилищ, как правило, $<1\%$ первичной продукции фитопланктона. По данным, полученным в 2015–2021 гг., рассматриваемый показатель составил: в Иваньковском водохранилище 0.82%, Угличском – 0.78, Рыбинском – 0.86, Горьковском – 0.46, Чебоксарском – 0.80, Куйбышевском – 0.76, Саратовском – 0.24, Волгоградском – 0.51 и в среднем для каскада 0.65%. Следовательно, почти все новообразованное при фотосинтезе ОВ (более 99% первичной продукции) подвергается деструкции. Полученные значения показателя согласуются с аналогичными величинами, известными для Мирового океана, пресноводных водоемов и биосфера в целом (Сигарева, 2012). Следовательно, можно

предположить, что на современном этапе эволюции продукционные и деструкционные процессы в экосистеме волжского каскада почти сбалансированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних наблюдений в 2015–2021 гг. за содержанием растительных пигментов в ДО волжского каскада позволили установить трофический статус бентали водохранилищ и незарегулированной части Нижней Волги. Показано, что наиболее продуктивные ДО формируются преимущественно в водохранилищах Верхней Волги, наименее продуктивные – в водохранилищах Нижней Волги и ее незарегулированном участке. Концентрации пигментов в ДО Иваньковского водохранилища соответствуют гипертрофной категории, Угличского, Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского – эвтрофной, Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского – мезотрофной, незарегулированной Волги – олиготрофной.

Во всех водохранилищах р. Волги современный уровень содержания осадочных пигментов близок к выявленному в конце XX в. Распределение пигментов в ДО волжского каскада согласуется со структурой грунтового комплекса, водно-физическими и химическими свойствами грунтов и скоростью течения. Низкое содержание остаточного органического углерода в ДО водохранилищ относительно первичной продукции свидетельствует об интенсивной ее утилизации в трофической сети. На современном этапе глобального потепления экосистема волжского каскада функционирует по-прежнему эффективно, поскольку из-за высокой гидродинамической активности и сильных течений не создаются условия для чрезмерного накопления ОВ в донных отложениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по государственному заданию № 124032100076-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гончаров А.В., Сахарова Е.Г., Фролова Н.Л., Полянин В.О. 2024. Особенности изменения фитопланктона по длине р. Урал в условиях эвтрофирования // Биология внутр. вод. № 1. С. 108.
<https://doi.org/10.31857/S0320965224010094>
- Дзюбан А.Н. 2010. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус.
- Законнов В.В., Законнова А.В. 2008. Географическая зональность осадконакопления в системе водохранилищ Волги // Изв. РАН. Сер. геогр. № 2. С. 105.
- Казанцева Т.И., Адамович Б.В. 2022. Факторы, в наибольшей степени определяющие динамику озерных экосистем при переменной нагрузке биогенными элементами: анализ данных многолетнего мониторинга Нарочанских озер // Сиб. экол. журн. Т. 29. № 4. С. 390.
- Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И. и др. 2018. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Тр. Ин-та биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 81 (84). С. 47.
- Минеева Н.М. 2009. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус. 279 с.
- Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. 2025. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ: современное состояние, тенденции многолетних изменений // Биология внутр. вод. № 1. С. 3.
<https://doi.org/10.31857/S0320965225010011>
- Номоконова В.И. 1989. Седиментация фитопланктона и его содержание в донных отложениях // Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука. С. 237.
- Пивоварова З.И., Стадник В.В. 1988. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат.
- Сигарева Л.Е. 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.: Тов-во науч. изданий КМК.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. 2018. Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги // Тр. Ин-та биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 81(84). С. 105.
- Сигарева Л.Е., Законнов В.В., Шарапова Н.А. 2000. Оценка экологического состояния оз. Плещеево по пигментным характеристикам донных отложений // Проблемы региональной экологии. № 6. С. 100.
- Сигарева Л.Е., Пырина И.Л., Тимофеева Н.А. 2016. Межгодовая динамика растительных пигментов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 76 (79). С. 119.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. 2018. М.: РАН.
- Теканова Е.В., Калинкина Н.М., Макарова Е.М., Смирнова В.С. 2023. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера // Биология внутр. вод. № 6. С. 740.
<https://doi.org/10.31857/S0320965223060335>
- Шимараева С.В., Пислегина Е.В., Кращук Л.С. и др. 2017. Динамика хлорофилла *a* в пелагиали Южного Байкала в период прямой температурной стратификации // Биология внутр. вод. № 1. С. 60.
<https://doi.org/10.7868/S0320965217010168>

- Александров С.В.* 2024. Многолетние изменения первичной продукции планктона в лагунной экосистеме Вислинского залива Балтийского моря // Биология внутр. вод. № 1. С. 43. <https://doi.org/10.31857/S0320965224010037>
- Alvarez-Cobelas M., Rojo C., Benavent-Corai J.* 2019. Long-term phytoplankton dynamics in a complex temporal realm // *Sci. Rep.* V. 9. article number 15967. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52333-z>
- 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>
- Buchaca T., Catalan J.* 2007. Factors influencing the variability of pigments in the surface sediments of mountain lakes // *Freshwater Biol.* V. 52. № 7. P. 1365. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01774.x>
- Buchaca T., Kosten S., Lacerot G. et al.* 2019. Pigments in surface sediments of South American shallow lakes as an integrative proxy for primary producers and their drivers // *Freshwater Biol.* V. 64. № 8. P. 1437. <https://doi.org/10.1111/fwb.13317>
- Burge D.R.L., Edlund M.B., Frisch D.* 2018. Paleolimnology and resurrection ecology: The future of reconstructing the past // *Evol. Appl.* V. 11. № 1. P. 42. <https://doi.org/10.1111/eva.12556>
- 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. 28 495. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18518-2>
- Cochrane S.K.J., Denisenko S.G., Renaud P.E. et al.* 2009. Benthic macrofauna and productivity regimes in the Barents Sea: ecological implications in a changing Arctic // *J. Sea Res.* V. 61. № 4. P. 222. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2009.01.003>
- Gangi D., Plastani M.S., Laprid C. et al.* 2020. Recent cyanobacteria abundance in a large sub-tropical reservoir inferred from analysis of sediment cores // *J. Paleolimnol.* V. 63. № 3. P. 195. <https://doi.org/10.1007/s10933-020-00110-8>
- Guimarães B.M.D.M., Neto I.E.L.* 2023. Chlorophyll-a prediction in tropical reservoirs as a function of hydro-climatic variability and water quality // *Environ. Sci. Pollut. Res.* V. 30. P. 91028. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28826-w>
- 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. Unraveling 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>
- 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>
- Leavitt P.R., Findlay D.L.* 1994. Comparison of fossil pigments with 20 years of phytoplankton data from eutrophic Lake 227, Experimental Lakes Area, Ontario // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 51. № 10. P. 2286. <https://doi.org/10.1139/f94-232>
- 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>
- 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>
- 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>
- Ostrovsky I., Yacobi Y.Z.* 1999. Organic matter and pigments in surface sediments: possible mechanisms of their horizontal distributions in a stratified lake // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 56. № 6. P. 1001. <https://doi.org/10.1139/f99-032>
- 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>
- 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>
- Trifonova I.S., Davydova N.N.* 1983. Diatoms in the plankton and sediments of two lakes of different trophic type // *Hydrobiologia*. V. 103. № 1. P. 265. <https://doi.org/10.1007/BF00028464>
- 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>
- Waters M.N., Golladay S.W., Patrick C.H. et al.* 2015. The potential effects of river regulation and watershed land use on sediment characteristics and lake primary producers in a large reservoir // *Hydrobiologia*. V. 749. № 1. P. 15. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2142-8>
- Zabala B., Achkar M., Aubriot L.* 2021. Hotspot analysis of spatial distribution of algae blooms in small and medium water bodies // *Environ. Monit. Assess.* V. 193. Article number 221. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08944-z>

Temporal and Spatial Dynamics of Plant Pigments in Bottom Sediments of the Volga River Reservoirs

L. E. Sigareva^{1,*}, N. A. Timofeeva¹, V. V. Zakonnov¹

¹*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 contents of plant pigments in bottom sediments of the Volga River reservoirs in the summer of 2015–2021 are presented. It has been shown that the production properties of benthal do not differ significantly from those at the end of the twentieth century. The concentrations of chlorophyll *a* and its degradation products, pheopigments, in the upper 5-cm layer of sediments decrease from the Upper Volga to the Lower Volga and its unregulated part, with the exception of the Cheboksary Reservoir with high values of pigment indicators. The spatial dynamics of sedimentary pigments largely depends on the morphometry of reservoirs and hydrodynamic activity affecting the distribution of bottom sediments. The concentrations of sedimentary pigments are positively related to the content of organic matter, water content, and the total contribution of aleuritic and pelitic fractions, and negatively related to the water current velocity, the mean diameter of particles, and volumetric mass of bottom sediments. It has been shown that the relationship between pigment content and depth in the reservoirs of the lower part of the cascade is weakened. During the study period, no temporal trends in the content of sedimentary pigments in reservoirs were identified. The average concentrations of sedimentary pigments in 2015–2021 characterize benthal in the Ivankovo reservoir as hypertrophic, in the Uglich, Rybinsk, Gorky, and Cheboksary reservoirs as eutrophic, in the Kuibyshev, Saratov, and Volgograd reservoir as mesotrophic, and in the unregulated Volga as oligotrophic. The content of chlorophyll *a* (with pheopigments) in bottom sediments in terms of the conditional biomass of algae amounts an insignificant part (0.24–0.86%) of the primary production of phytoplankton, the main producer of organic matter in the Volga River reservoirs.

Keywords: chlorophyll *a*, pheopigments, bottom sediments, trophic state, Volga River reservoirs