







DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241206>

EDN: <https://elibrary.ru/lhixpl>

УДК 551.312.051(282.247.413.5)

*Научный обзор*

## **Динамика седиментационных процессов в Рыбинском водохранилище и их влияние на продуктивность донных осадков**

В.В. Законнов\* , Л.Е. Сигарева , Н.А. Тимофеева ,  
А.В. Законнова 

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

\*zak@ibiw.ru

**Аннотация.** Работа служит продолжением исследования структуры дна Рыбинского водохранилища и его трансформации. По результатам мониторинга абиотических характеристик водоема определены: трансформация площадей структуры дна, динамика седиментационных процессов (объем, масса, темпы накопления), концентрации органического вещества и биогенных элементов, а также растительных пигментов по толщине кернов в годы грунтовых съемок. Материалы представлены в виде матрицы из 20 параметров, наиболее полно отражающих взаимосвязи в системе вода – донные отложения. Анализируемые данные близки к среднегодовалым и соответствуют реальной картине продуктивности дна экосистемы. Показано, что между отдельными компонентами наблюдаются как положительные, так и отрицательные корреляционные зависимости, что указывает на необходимость продолжения детальных исследований. При  $R^2 < 40$  выявлена неопределенная связь гидрологических характеристик, содержания органического вещества и биогенных элементов в донных отложениях; при  $R^2 > 50$  – тенденция увеличения площадей осадконакопления; при  $R^2 > 60$  –положительный тренд толщины осадков, объема и массы илов, а также содержания хлорофилла и феопигментов.

**Ключевые слова:** мониторинг, распределение, накопление, темпы седиментации, биогенные элементы, растительные пигменты

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства высшего образования и науки РФ (гос. тема № 124032100076-2).

**ORCID:**

В.В. Законнов, <https://orcid.org/0000-0003-1621-6108>

Л.Е. Сигарева, <https://orcid.org/0000-0003-4894-3262>

Н.А. Тимофеева, <https://orcid.org/0000-0002-6134-9789>

А.В. Законнова, <https://orcid.org/0000-0002-1508-1224>

**Для цитирования:** Законнов, В.В. и др., 2026. Динамика седиментационных процессов в Рыбинском водохранилище и их влияние на продуктивность донных осадков. *Трансформация экосистем* 9 (2), 217–229. <https://doi.org/10.23859/estr-241206>

Поступила в редакцию: 06.12.2024

Принята к печати: 25.04.2025

Опубликована онлайн: 29.05.2026

---

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241206>

EDN: <https://elibrary.ru/lhixpl>

UDC 551.312.051(282.247.413.5)

## Review

# Dynamics of sedimentation processes in the Rybinsk Reservoir and their impact on bottom sediment productivity

V.V. Zakonnov , L.E. Sigareva , N.A. Timofeeva ,  
A.V. Zakonnova 

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouzsky District, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia*

\*zak@ibiw.ru

---

**Abstract.** This work is a continuation of the study of the bottom structure in the Rybinsk Reservoir and its transformation. Based on the results of monitoring the abiotic parameters of the reservoir, the transformation of its bottom sites, the dynamics of sedimentation processes (volume, mass, accumulation rates), the concentrations of organic matter and nutrients, as well as plant pigments present in a core thickness in the years of soil surveys have been determined. The materials are presented in the form of a matrix of 20 parameters that most fully reflect the interrelations in the water-bottom sediment system. The analyzed data are close to the long-term average and correspond to actual productivity of the ecosystem bottom. Both, positive and negative correlations are observed between individual components, indicating the need to continue the detailed research. We have established the uncertain relationship between hydrological characteristics, the content of organic matter and nutrients in bottom sediments at  $R^2 < 40$ , a trend towards increasing sedimentation areas at  $R^2 > 50$ , and a positive trend in sediment thickness, silt volume and mass, as well as the content of chlorophyll and pheopigments at  $R^2 > 60$ .

**Keywords:** monitoring, distribution, accumulation, sedimentation rates, nutrients, plant pigments

**Funding.** This work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation (No. 124032100076-2).

**ORCID:**V.V. Zakonnov, <https://orcid.org/0000-0003-1621-6108>L.E. Sigareva, <https://orcid.org/0000-0003-4894-3262>N.A. Timofeeva, <https://orcid.org/0000-0002-6134-9789>A.V. Zakonnova, <https://orcid.org/0000-0002-1508-1224>

**To cite this article:** Zakonnov, V.V. et al., 2026. Dynamics of sedimentation processes in the Rybinsk Reservoir and their impact on bottom sediment productivity. *Ecosystem Transformation* 9 (2), 217–229. <https://doi.org/10.23859/estr-241206>

Received: 06.12.2024

Accepted: 25.04.2025

Published online: 29.05.2026

---

**Введение**

Систематизация факторов и процессов, участвующих в самоочищении воды, осмыслена многими авторами (Остроумов, 2005). Однако применение количественных показателей в данной сфере ограничено, что не позволяет оценить их роль как внутри природных сред, так и на их стыке.

При моделировании процессов и составлении прогнозов важно оперировать не только площадями различных типов донных отложений, но и величинами, связанными с их накоплением – скоростью седиментации и качеством субстрата.

**Материалы и методы**

Работа служит продолжением исследования структуры дна Рыбинского водохранилища и его трансформации (Законнов и др., 2026). Предлагается база данных по Рыбинскому водохранилищу в системе вода – донные отложения (ДО), позволяющая выявить количественные зависимости характеристик на цифровой основе (Законнов, 2007; Сигарева, 2012; Сигарева и Тимофеева, 2023).

Методики исследования, отработанные на Рыбинском водохранилище, могут использоваться на других водных объектах, где имеются заделы по цифровизации абиотических характеристик, моделированию, прогнозированию, созданию тематических карт и карт грунтового комплекса высокой разрешимости, данные по составу и качеству природных вод, донных отложений и биотической составляющей автохтонного происхождения – бактерий, водорослей, зоопланктона, макрочлеников, бентосоядных рыб (Географические методы..., 2024; Лазарева, 2010; Сигарева, 2012).

Процессы осадкообразования рассматриваются нами с трех позиций:

- 1) занесение на площадь водохранилища при НПУ;
- 2) осадконакопление – на ареалы распределения крупнозернистых наносов (песков) и тонкодисперсных отложений (илов), без зон размыва дна и гидроморфного почвообразования (болот);
- 3) илонакопление – на участки сосредоточения илисто-глинистых, песчано-глинистых и торфянистых осадков, обладающих высокими сорбционными способностями к депонированию органического вещества, биогенных элементов (С, N, P) и загрязняющих веществ.

**Результаты и обсуждение**

Седиментация носит характер стохастического процесса, стремящегося к упорядочению. Донные отложения, с одной стороны, представляют собой динамические системы, которые изменяются во времени и пространстве, а с другой – достаточно консервативные образования. Прежде всего, формирование ДО зависит от водно-балансовых характеристик, уровня режима, ветро-волнового воздействия, режима эксплуатации гидросооружений, источников и состава грунтообразующего материала (абразии берегов, эрозии дна и площади водосбора, твердого стока рек, гранулометрии, литологии осадочных пород бассейна, продукции гидробионтов, антропогенных загрязнений).

**Табл. 1.** Распределение и накопление донных отложений в плесах Рыбинского водохранилища к 2022 г. F – площадь;  $h_{cp}$  – средняя толщина ДО; W – объем; M – воздушно-сухая масса.

Тип ДО	F, км <sup>2</sup>	$h_{cp}$ , мм	W, млн м <sup>3</sup>	M, млн т	Среднегодовое накопление			
					h, мм	W млн м <sup>3</sup>	M, млн т	M, кг/м <sup>2</sup>
Волжский								
Почвы болотные	15	–	–	–	–	–	–	–
Трансформированные грунты	102	–	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые	260	72	18.7	26.2	0.9	230.9	323.5	1.2
Тонкодисперсные	173	440	76.1	22.8	5.4	939.5	281.5	1.6
Осадконакопление	433	219	94.8	49.0	2.7	1170.4	605.0	1.4
Моложский								
Почвы болотные	7	–	–	–	–	–	–	–
Трансформированные грунты	8	–	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые	150	96	14.4	20.2	1.2	177.8	249.4	1.7
Тонкодисперсные	45	224	10.1	3.3	2.8	124.7	40.7	0.9
Осадконакопление	195	126	24.5	23.5	1.6	302.5	290.1	1.5
Шекснинский								
Почвы болотные	22	–	–	–	–	–	–	–
Трансформированные грунты	75	–	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые	420	96	40.3	56.5	1.2	497.5	697.5	1.7
Тонкодисперсные	180	416	74.9	22.5	5.1	924.7	277.8	1.5
Осадконакопление	600	192	115.2	79.0	2.4	1422.2	975.3	1.6
Главный								
Почвы болотные	28	–	–	–	–	–	–	–
Трансформированные грунты	387	–	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые	1800	80	144.0	201.6	1.4	1777.8	2488.9	1.4
Тонкодисперсные	870	520	452.4	135.6	1.9	5585.2	1674.1	1.9
Осадконакопление	2670	223	596.4	337.2	1.6	7363.0	4163.0	1.6

**Табл. 2.** Многолетняя динамика осадконакопления в Рыбинском водохранилище. \* – прогноз к 100-летию водохранилища.

Параметр	Год							
	1955	1965	1978	1994	2010	2022	2041*	
Средняя толщина песков, мм	56	154	104	61	31	83	80	
Средняя толщина илов, мм	192	123	171	339	408	484	580	
Средняя толщина осадков, мм	129	135	140	148	153	213	300	
Скорость осадконакопления, мм/год	средняя многолетняя	9.2	5.6	3.8	2.9	2.2	2.6	3.0
	по периодам	9.2	6.0	3.8	5.7	2.8	5.0	4.0

**Табл. 3.** Интенсивность седиментации (занесения) по глубинам Рыбинского водохранилища к 2022 г. Обозначения как в Табл. 1.

Глубина, м	F		h <sub>ср</sub> , мм	W, млн м <sup>3</sup>	M, млн т	Среднегодовое накопление			
	км <sup>2</sup>	%				h, мм	W, млн м <sup>3</sup>	M, млн т	M, кг/м <sup>2</sup>
0–4	1796.6	40	60	108	162	0.7	1.3	2.0	1.1
4–6	686.4	15	70	48	60	0.9	0.6	0.8	1.1
6–8	806.3	18	80	65	85	1.0	0.8	1.0	1.3
8–10	614.8	14	470	289	87	5.8	3.6	1.1	1.7
10–14	515.7	12	510	263	79	6.3	3.3	1.0	1.9
>14	60.2	1	960	58	16	11.9	0.7	0.2	3.3
Итого	4480	100	185	831	489	2.3	10.3	6.1	1.3

**Табл. 4.** Многолетняя динамика илонакопления в Рыбинском водохранилище. Обозначения как в Табл. 1.

Год	F, км <sup>2</sup>	h <sub>ср</sub> , мм	W, млн м <sup>3</sup>	M, млн т	Среднегодовое накопление			
					h, мм	W, млн м <sup>3</sup>	M, млн т	M, кг/м <sup>2</sup>
1955	1092	192	210	83	13.7	15.0	5.9	5.4
1965	2093	123	257	90	5.1	10.7	3.8	1.8
1978	1865	171	319	95	4.6	8.6	2.6	1.4
1994	1138	339	386	116	6.6	7.6	2.3	2.0
2010	1254	408	572	154	5.9	7.4	2.2	1.8
2022	1268	484	614	184	6.0	7.6	2.3	1.8
2041	1383	580	802	250	5.8	8.0	2.5	1.8

База седиментационных данных нижнего яруса экосистемы Рыбинского водохранилища представлена в Табл. 1–4, подводящих итог мониторинговых гидрологических съемок с 1955 по 2022 г. Она позволила создать матрицу из большого количества абиотических параметров ( $> 50$ ), которые характеризуют синэкологическую кооперативность внешних и внутриводоемных процессов. Для дальнейшего анализа из всех гидроморфометрических, гидродинамических, седиментационных и химических параметров выбрано 20, которые характеризуют связи внутри сопряженных сфер и влияют на продуктивность ДО (Табл. 5).

На основе значений линейного коэффициента детерминации ( $R^2$ ) выявлены следующие тенденции (тренды) изменения абиотических характеристик во времени и пространстве:

- при  $R^2 < 0.40$  (0.03–0.33) отмечена неопределенность (хаос) для 10 параметров, действующих разнонаправленно: природных ритмов водности ( $W_n$ ), в том числе по периодам между грунтовыми съемками, регулирования стока ( $W_c$ ) и соответственно уровня режима (Н), колебания площадей илонакопления ( $F_{и1}$ ), среднегодового слоя илов ( $h_{и1}$ ) и их массы на квадратный метр ( $M_{и2}$ ), а также содержания ОВ, С, N, P. Последние попадают в водоем в основном за счет продукции гидробионтов и частично со сточными водами, а также в минимальных количествах за счет абразии;
- при  $R^2$ , близком к 0.50 (0.45–0.59), наблюдается тенденция увеличения площади осадконакопления ( $F_o$ ) за счет ареалов крупнозернистых наносов (песков), в которых концентрации ОВ, С, N, P минимальны;
- при  $R^2 > 0.60$  (0.65–0.98) остальные 9 параметров демонстрируют тренд на увеличение: толщины осадков и илов ( $h_o$  и  $h_{и1}$ ), объема и массы илов ( $W_{и1}$  и  $M_{и1}$ ), скорости накопления по объему и массе ( $W_{и1}$  и  $M_{и1}$ ), среднего диаметра и количества пелитовых частиц ( $d_1$  и  $d_2$ ), а также содержания хлорофилла и феопигментов (Хл + Ф) – основного легкоусвояемого ОВ автохтонного происхождения.

Статистические методы обработки данных позволяют выявить не только ранее определенные простые связи и зависимости, но и более сложные, которые прямо или косвенно воздействуют на структуру нижнего яруса, и в целом на всю экосистему водоема. Анализ фондовых материалов (Табл. 6) показал, что кроме значимых коэффициентов корреляции имеются и другие (0.30–0.80), объясняемые природными и техногенными факторами.

Основой функционирования водохранилища являются объемы притока и стока воды, влияющие на абиотические показатели, формирующие сбалансированную природно-техногенную экосистему. Их воздействие, прежде всего, сказывается на уровненом режиме, управляемом человеком, толщине илов и среднегодовой скорости осадконакопления, а также на концентрациях биогенных элементов и Хл + Ф.

Площади осадконакопления в водохранилище имеют отрицательные связи со многими характеристиками, поскольку песчаные и илистые отложения отличаются неравномерным накоплением во времени и пространстве, что сказывается на концентрациях ОВ, С, N, P. Поэтому средняя толщина донных осадков находится в прямой связи с объемом и массой илов, а также концентрацией Хл + Ф (0.82–0.99) и в отрицательной – со скоростью илонакопления и средним диаметром частиц. В то же время наблюдается положительная корреляция с количеством пелитовых частиц – основных сорбентов ОВ, биогенных элементов, осадочных пигментов и загрязняющих веществ.

Гранулометрический состав наносов играет большую роль для Рыбинского водохранилища, так как он определяется гидравлической крупностью слагающих структуру минерально-органических осадков (песчаных фракций) и соответствующих размерных остатков макрофитных частиц и торфяной крошки (илистая фракция).

Выявлена положительная корреляция содержания биогенных элементов с объемами притока и стока, годовым накоплением илов и отрицательная – с площадью осадконакопления. Из биогенных элементов выделяется фосфор, который положительно коррелирует с объемами притока и стока, уровнем воды в навигационный период, массой илов и скоростями их накопления в годовом исчислении и отрицательно связан с площадями осадконакопления, в частности илов, и количеством пелитовой фракции. Фосфор в водохранилище поступает с твердым стоком рек, абразией берегов, а также со сточными водами промышленных и сельскохозяйственных предприятий, в то время как остальные биогенные элементы продуцируются фитопланктоном и макрофитами в водоеме.

**Табл. 5.** Абиотические характеристики экосистемы Рыбинского водохранилища (средние показатели).  $W_n$  – объем притока, км<sup>3</sup>;  $W_c$  – объем стока, км<sup>3</sup>;  $H$  – уровень водохранилища за период открытой воды, м БС;  $F_o$  – площадь осадконакопления, км<sup>2</sup>;  $h_o$  – слой осадков, мм;  $F_{и1}$  – площадь илонакопления, км<sup>2</sup>;  $h_{и1}$  – слой илов, мм;  $h_{и1г}$  – годовой слой илонакопления, мм/год;  $W_{и1}$  – объем илов, млн м<sup>3</sup>;  $W_{и1г}$  – годовое накопление илов, млн м<sup>3</sup>/год;  $M_{и1}$  – масса илов, млн т;  $M_{и1г}$  – годовое накопление илов, млн т/год;  $M_{и2}$  – годовое накопление илов, кг/м<sup>2</sup>;  $d_1$  – средний диаметр частиц, мм;  $d_2$  – количество пелитовых (< 0.01 мм) частиц, %; ОВ – органическое вещество, %; С – углерод общий, %; N – азот общий, %; P – фосфор общий, %; Хл + Ф – хлорофилл + феопигменты, мкг/г.

Параметр	Год						R <sup>2</sup>
	1955	1965	1978	1994	2010	2022	
$W_n$	34.88	33.88	28.21	35.94	31.52	35.4	0.09
$W_c$	33.78	31.81	26.95	33.81	30.93	34.39	0.03
$H$	101.03	101.05	100.64	100.9	100.79	100.97	0.13
$F_o$	2002	3776	3685	3646	3897	3898	0.45
$h_o$	129	135	140	148	153	213	0.70
$F_{и1}$	1092	2093	1865	1138	1254	1268	0.13
$h_{и1}$	192	121	171	339	408	484	0.88
$h_{и1г}$	13.7	5.1	4.6	6.6	5.9	6.0	0.24
$W_{и1}$	210	257	319	386	512	614	0.98
$W_{и1г}$	15.0	10.7	8.6	7.6	7.4	7.6	0.69
$M_{и1}$	83	90	95	116	154	184	0.92
$M_{и1г}$	5.9	3.8	2.6	2.3	2.2	2.3	0.67
$M_{и2}$	5.4	1.8	1.4	2	1.8	1.8	0.33
$d_1$	0.2	0.12	0.1	0.09	0.09	0.08	0.65
$d_2$	45	52	53	54	55	57	0.77
ОВ	21.2	19.7	19	10.6	19.6	20	0.03
С	8.7	6.0	4.7	4.9	4.9	6.0	0.30
N	0.54	0.4	0.35	0.36	0.37	0.45	0.12
P	0.15	0.14	0.07	0.12	0.14	0.15	0.02
Хл + Ф	87.6	98.4	97.3	99.8	106.7	146.9	0.68

**Табл. 6.** Корреляционная матрица абиотических характеристик Рыбинского водохранилища. Жирным шрифтом отмечены значимые коэффициенты корреляции. Обозначения те же, что в Табл. 5.

Параметр	$W_n$	$W_c$	H	$F_o$	$h_o$	$F_{и}$	$h_{и}$	$h_{и1}$	$W_{и}$	$W_{и1}$
$W_n$	1.00	<b>0.98</b>	0.67	-0.24	0.29	-0.51	0.32	0.41	0.11	0.20
$W_c$	<b>0.98</b>	1.00	0.61	-0.28	0.38	-0.62	0.44	0.48	0.21	0.20
H	0.67	0.61	1.00	-0.21	-0.06	0.18	-0.26	0.25	-0.30	0.47
$F_o$	-0.24	-0.28	-0.21	1.00	0.46	0.39	0.39	<b>-0.96</b>	0.63	<b>-0.91</b>
$h_o$	0.29	0.38	-0.06	0.46	1.00	-0.28	<b>0.82</b>	-0.30	<b>0.89</b>	-0.54
$F_{и}$	-0.51	-0.62	0.18	0.39	-0.28	1.00	-0.64	-0.58	-0.35	-0.04
$h_{и}$	0.32	0.44	-0.26	0.39	<b>0.82</b>	-0.64	1.00	-0.16	<b>0.94</b>	-0.62
$h_{и1}$	0.41	0.48	0.25	<b>-0.96</b>	-0.30	-0.58	-0.16	1.00	-0.44	<b>0.83</b>
$W_{и}$	0.11	0.21	-0.30	0.63	<b>0.89</b>	-0.35	<b>0.94</b>	-0.44	1.00	-0.77
$W_{и1}$	0.20	0.20	0.47	<b>-0.91</b>	-0.54	-0.04	-0.62	<b>0.83</b>	-0.77	1.00
$M_{и}$	0.19	0.31	-0.19	0.55	<b>0.91</b>	-0.39	<b>0.95</b>	-0.34	<b>0.99</b>	-0.67
$M_{и1}$	0.24	0.25	0.50	<b>-0.91</b>	-0.53	-0.06	-0.59	<b>0.85</b>	-0.75	1.00
$M_{и2}$	0.37	0.43	0.30	<b>-0.98</b>	-0.36	-0.48	-0.26	<b>0.99</b>	-0.51	<b>0.89</b>
$d_1$	0.18	0.20	-0.37	<b>-0.96</b>	-0.57	-0.15	-0.57	<b>0.89</b>	-0.75	<b>0.99</b>
$d_2$	-0.09	-0.09	-0.29	<b>0.94</b>	0.70	0.09	0.67	<b>-0.84</b>	<b>0.84</b>	<b>-0.96</b>
OB	-0.30	-0.18	0.16	-0.26	0.06	0.25	-0.18	0.23	-0.06	0.45
C	0.45	0.50	0.53	<b>-0.89</b>	-0.18	-0.30	-0.27	<b>0.90</b>	-0.45	<b>0.91</b>
N	0.50	0.58	0.47	-0.81	0.04	-0.41	-0.06	<b>0.87</b>	-0.24	0.80
P	0.76	<b>0.83</b>	0.70	-0.25	0.29	-0.44	0.36	0.45	0.21	0.30
Хл + Ф	0.26	0.34	0.01	0.52	<b>0.99</b>	-0.17	0.78	-0.36	<b>0.88</b>	-0.55

$M_i$	$M_{i1}$	$M_{i2}$	$d_1$	$d_2$	OB	C	N	P	Хл+ Ф
0.19	0.24	0.37	0.18	-0.09	-0.30	0.45	0.50	0.76	0.26
0.31	0.25	0.43	0.20	-0.09	-0.18	0.50	0.58	<b>0.83</b>	0.34
-0.19	0.50	0.30	0.37	-0.29	0.16	0.53	0.47	0.70	0.00
0.55	<b>-0.91</b>	<b>-0.98</b>	<b>-0.96</b>	<b>0.94</b>	-0.26	<b>-0.89</b>	-0.81	-0.25	0.52
<b>0.91</b>	-0.53	-0.36	-0.57	0.70	0.06	-0.18	0.04	0.29	<b>0.99</b>
-0.39	-0.06	-0.48	-0.15	0.09	0.25	-0.30	-0.41	-0.44	-0.17
<b>0.95</b>	-0.59	-0.26	-0.57	0.67	-0.18	-0.27	-0.06	0.36	0.78
-0.34	<b>0.85</b>	<b>0.99</b>	<b>0.89</b>	<b>-0.84</b>	0.23	<b>0.90</b>	<b>0.87</b>	0.45	-0.36
<b>0.99</b>	-0.75	-0.51	-0.75	<b>0.84</b>	-0.06	-0.45	-0.24	0.21	<b>0.88</b>
-0.67	<b>1.00</b>	<b>0.89</b>	<b>0.99</b>	<b>-0.96</b>	0.45	<b>0.91</b>	0.80	0.30	-0.55
1.00	-0.65	-0.41	-0.66	0.77	0.02	-0.33	-0.11	0.34	<b>0.90</b>
-0.65	1.00	<b>0.90</b>	<b>0.99</b>	<b>-0.95</b>	0.44	<b>0.93</b>	<b>0.81</b>	0.34	-0.53
-0.41	<b>0.90</b>	1.00	<b>0.94</b>	<b>-0.89</b>	0.29	<b>0.93</b>	<b>0.88</b>	0.43	-0.41
-0.66	<b>0.99</b>	<b>0.94</b>	1.00	<b>-0.98</b>	0.40	<b>0.90</b>	0.79	0.28	-0.59
0.77	<b>-0.95</b>	<b>-0.89</b>	<b>-0.98</b>	1.00	-0.29	-0.81	-0.67	-0.13	0.73
0.02	0.44	0.29	0.40	-0.29	100	0.48	0.51	0.26	0.12
-0.33	<b>0.93</b>	<b>0.93</b>	<b>0.90</b>	-0.81	0.48	1.00	<b>0.97</b>	0.57	-0.21
-0.11	<b>0.81</b>	<b>0.88</b>	0.79	-0.67	0.51	<b>0.97</b>	1.00	0.63	0.02
0.34	0.34	0.43	0.28	-0.13	0.26	0.57	0.63	1.00	0.30
<b>0.90</b>	-0.53	-0.41	-0.59	0.73	0.12	-0.21	0.02	0.30	1.00

Хлорофилл и феопигменты положительно коррелируют со многими абиотическими показателями, но имеют отрицательные связи со скоростью седиментации илов, толщиной осадков и средним диаметром частиц, поскольку их депонирование в осадках зависит от автохтонных продуцентов и опережающих темпов седиментации минеральных частиц по сравнению с органическими. Последние в толще воды необратимо деградируют вследствие активного перемешивания водных масс.

По данным альгологических исследований (Табл. 7), на пяти стандартных станциях среднее по вертикали кернов содержание Хл + Ф на сухой осадок (с.о.) в 2019 г. по сравнению с 2009 г. увеличилось в 1.5 раза. При этом среднее содержание пигментов в кернах Главного плеса (Средний Двор, Брейтово) возросло в 1.6 раза, в верхних (речных) участках (Коприно, Молога, Череповец) – в 1.2 раза (Сигарева, 2012; Сигарева и др., 2013).

Величины индекса  $E_{480/665}$  (показателя физиологического состояния растительных организмов) в колонках грунта были выше, чем значения, известные для фитопланктона и макрофитов. Так, индексы для планктонных водорослей изменяются от 0.79 до 1.38 (Минеева, 2004, 2021), а для макрофитов – от 0.68 до 0.99 (Сигарева и Тимофеева, 2023). Повышение величины  $E_{480/665}$  объясняется возрастанием вклада феопигментов, у которых удельное поглощение меньше, чем у хлорофилла (Lorenzen, 1967), а также повышенной скоростью деградации хлорофилла до бесцветных продуктов по сравнению с каротиноидами.

Причины изменения корреляционных связей анализируемых характеристик могут скрываться в различиях внутриводоемных абиотических и биотических процессах, влияющих на распределение и состав пигментного комплекса в зависимости от типа ДО и содержащейся в них трудноминерализуемой органики. Потребление кислорода в песчаных наносах меньше, чем в илистых отложениях, вследствие различной численности бактерий на частицах грунта, а также из-за свойств ОВ – автохтонного (планктоногенного) и аллохтонного (с преобладанием гумуса) происхождения (Бреховских и др., 2006; Сорокин, 1959, 1967; Романенко и Законнов, 1990).

В период глобального потепления Рыбинское водохранилище по содержанию в воде хлорофилла характеризуется как мезотрофный водоем, по продукции водорослей, бактерий, зоопланктона и биомассе бентоса – эвтрофный (Структура..., 2018). Подтверждением изменения трофности служит увеличение средней температуры воды (одного из факторов продуктивности) на 1.0–1.5 °С в летний период 2001–2019 гг. (Законнова, 2021), а также материалы по кислородному режиму волжских и камских водохранилищ за этот период (Лазарева и др., 2018).

Донные отложения Рыбинского водохранилища отличаются повышенными концентрациями органического вещества и биогенных элементов. Особенно выделяются торфогенные илы, перегруженные лигнино-гумусовыми веществами, составляющими 35–50% массы илов и около 80% общего ОВ, но трудноусвояемые гидробионтами (Сорокин, 1959).

**Табл. 7.** Пигментные характеристики ДО в кернах Рыбинского водохранилища.  $E_{480/665}$  – отношение (каротиноиды/хлорофилл) оптических плотностей экстракта на длинах волн 480 и 665 нм (Сигарева и Тимофеева, 2023).

Станция	Хл + Ф (2009)			Хл + Ф (2019)		
	мкг/г с.о.	$E_{480/665}$	ОВ, %	мкг/г с.о.	$E_{480/665}$	ОВ, %
Коприно	44.1 ± 2.9	3.3 ± 0.14	15.3	58.0 ± 3.1	3.3 ± 0.05	17.5
Молога	90.0 ± 4.2	2.7 ± 0.04	21.2	109.1 ± 4.9	1.9 ± 0.04	13.0
Средний Двор	140.0 ± 5.4	2.0 ± 0.07	34.8	252.4 ± 4.0	2.0 ± 0.04	42.6
Брейтово	76.7 ± 3.0	2.4 ± 0.04	23.9	133.0 ± 6.8	2.2 ± 0.03	16.4
Череповец	48.7 ± 3.7	3.8 ± 0.06	9.8	55.7 ± 2.3	3.01 ± 0.04	10.8

## Заключение

Рыбинское водохранилище обладает большим разнообразием грунтового комплекса, где в различных типах ДО аккумулируются как полезные компоненты для жизнедеятельности гидробионтов, так и вредные вещества, поступающие с атмосферными осадками, промышленно-бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Процессы, происходящие в водных массах и нижнем ярусе экосистемы, своеобразны и неоднозначны, поэтому требуется их детальное изучение.

Средние данные, близкие к среднемноголетним величинам, достаточно информативны, соответствуют реальной картине и позволяют надежно оценить биопродуктивность экосистемы как высокопродуктивную. Подобные исследования дают возможность прогнозировать изменения в пресноводных водоемах, а также оценивать продукционные возможности существующих и проектируемых водохранилищ.

## Список литературы

- Бреховских, В.Ф., Вишневецкая, Г.Н., Кременецкая, Е.Р., Ломова, Д.В., 2006. Об оценке потребления кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период. *Метеорология и гидрология* 10, 82–91.
- Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов, 2024. Поддубный, С.А. (ред.). Филигрань, Ярославль, Россия, 206 с.
- Законнов, В.В., 2007. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук*. Москва, Россия, 42 с.
- Законнов, В.В., Поддубный, С.А., Законнова, А.В., 2026. Структура дна Рыбинского водохранилища и его трансформация. *Трансформация экосистем* 9 (1) (in press). <https://doi.org/10.23859/estr-241204>
- Законнова, А.В., 2021. Климатические изменения термического режима Рыбинского водохранилища. *Труды Института биологии внутренних вод РАН* 94 (97), 7–16.
- Лазарева, В.И., 2010. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 183 с.
- Лазарева, В.И., Степанова, И.Э., Цветков, А.И., Пряничникова, Е.Г., Перова, С.Н., 2018. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса. *Труды Института биологии внутренних вод РАН* 81 (84), 47–84.
- Минеева, Н.М., 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Наука, Москва, Россия, 156 с.
- Минеева, Н.М., 2021. Многолетняя динамика хлорофилла в планктоне различных участков крупного равнинного водохранилища. *Биология внутренних вод* 6, 574–<https://doi.org/10.31857/S0320965221060127>
- Остроумов, С.А., 2005. О самоочищении водных экосистем. Антропогенное влияние на водные экосистемы. *Тезисы докладов конференции, посвященной 100-летию со дня рождения проф. Н.С. Строганова*. Москва, Россия, 94–119.
- Романенко, В.И., Законнов, В.В., 1990. Общее количество бактерий в донных отложениях Рыбинского водохранилища на частицах разного размера. *Биология внутренних вод. Информационный бюллетень* 87, 9–13.
- Сигарева, Л.Е., 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 217 с.

- Сигарева, Л.Е., Законнов, В.В., Тимофеева, Н.А., Касьянова, В.А., 2013. Осадочные пигменты и скорость илонакопления как показатели трофического состояния Рыбинского водохранилища. *Водные ресурсы* **40** (1), 62–69.
- Сигарева, Л.Е., Тимофеева, Н.А., 2023. Пигментные характеристики макрофитов Рыбинского водохранилища. *Биология внутренних вод* **3**, 420–424. <https://doi.org/10.31857/S0320965223030233>
- Сорокин, Ю.И., 1959. Биомасса бактерий и химический состав грунтов Рыбинского водохранилища. *Бюллетень Института биологии водохранилищ АН СССР* **4**, 3–6.
- Сорокин, Ю.И., 1967. Некоторые итоги изучения трофической роли бактерий в водохранилищах. *Гидробиологический журнал* **3** (5), 32–42.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века, 2018. Лазарева, В.И. (ред.). РАН, Москва, Россия, 456 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036185000001>
- Lorenzen, C.J., 1967. Determination of chlorophyll and phalpigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* **12** (2), 343–346.

## References

- Brekhovskikh, V.F., Vishnevskaya, G.N., Kremenetskaya, E.R., Lomova, D.V., 2006. Ob ocenke potrebleniya kisloroda raznymi tipamy gruntov dolinnykh vodokhranilishch [On the assessment of oxygen consumption by different types of soils of valley reservoirs in the summer period]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]* **10**, 82–91. (In Russian).
- Geograficheskie metody izucheniya ekosistem vnutrennich vodoemov [Geographical methods of studying ecosystems of inland reservoirs], 2024. S.A. Poddubny (ed.). Filigran', Yaroslavl, Russia, 206 p. (In Russian).
- Lazareva, V.I., 2010. Struktura i dinamika zooplanktona Rybinskogo vodokhranilishcha [Zooplankton structure and dynamics in the Rybinsk Reservoir]. KMK Scientific Press Ltd, Moscow, Russia, 83 p. (In Russian).
- Lazareva, V.I., Stepanova, I.E., Tsvetkov, A.I., Pryanichnikova, E.G., Perova, S.N., 2018. Kislorodnii regim Volgi i Kamy v period potepeniya klimata: posledstviya dlya zooplanktona i zoobentosa [The oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming: consequences for zooplankton and zoobenthos]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I.D.Papanina [Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS]* **94** (97), 7–16. (In Russian).
- Lorenzen, C.J., 1967. Determination of chlorophyll and phalpigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* **12** (2), 343–346.
- Mineeva, N.M., 2004. Rastitelinye pigmenty v vode volgskikh vodokhranilishch [Plant pigments in the water of the Volga reservoirs]. Nauka, Moscow, Russia, 156 p. (In Russian).
- Mineeva, N.M., 2021. Long-term dynamics of Chlorophyll in Plankton of different Sites in large plain Reservoir. *Inland Water Biology* **14**, 679–690. <https://doi.org/10.1134/S1995082921060092>
- Ostroumov, S.A., 2005. O samoochishchenii vodnykh ekosistem. Antropogennoe vliyanie na vodnye ekosistemy [About self-purification of aquatic ecosystems. Anthropogenic impact on aquatic ecosystems]. *Tezisy dokladov konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia prof. N.S. Stroganov* [Abstracts of the conference devoted to the 100th anniversary of the birth of prof. N.S. Stroganov]. Moscow, Russia, 94–119. (In Russian).

- Romanenko, V.I., Zakonnov, V.V., 1990. Obshchee kolichestvo bakterii v donnykh otlogenyakh Rybinskogo vodokhranilishcha [The total number of bacteria in the bottom sediments of the Rybinsk reservoir on particles of different sizes]. *Biologiya vnutrennikh vod. Informatsionnyi bulleten' [Inland Waters Biology. Newsletter]* **87**, 9–13. (In Russian).
- Sigareva, L.E., 2012. Chlorofill v donnykh otlogenyakh volghskikh vodoemov [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga water bodies]. KMK Scientific Press Ltd, Moscow, Russia, 217 p. (In Russian).
- Sigareva, L.E., Zakonnov, V.V., Timofeeva, N.A., Kas'yanova, V.V., 2013. Sediment pigments and silting rate as indicator of the trophic condition of the Rybinsk reservoir. *Water Resources* **40** (1), 54–60.
- Sigareva, L.E., Timofeeva, N.A., 2023. Pigment characteristics of macrophytes from the Rybinsk Reservoir. *Inland Water Biology* **3**, 577–580. <https://doi.org/10.1134/S1995082923030203>
- Sorokin, Yu.I., 1959. Biomassa bakterii i khimicheskii sostav gruntov Rybinskogo vodokhranilishcha [The biomass of bacteria and the chemical composition of the soils of the Rybinsk reservoir]. *Bulleten' Instituta biologii vodokhranilishch AN SSSR [Bulletin of the Institute of Biology of Reservoirs of the USSR Academy of Sciences]* **4**, 3–6. (In Russian).
- Sorokin, Yu.I., 1967. Nekotorye itogi izucheniya troficheskoi roli bakterii v vodokhranilishchakh [Some results of the study of the trophic role of bacteria in reservoirs]. *Gidrobiologicheskii zhurnal [Hydrobiological Journal]* **3** (5), 32–42. (In Russian).
- Struktura i funkcionirovanie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka [Structure and functioning of the ecosystem of the Rybinsk Reservoir at the beginning of the 21st century], 2018. Lazareva, V.I. (ed.). Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 456 p. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S978590703618500001>
- Zakonnov, V.V., 2007. Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volgskogo kaskada [Sedimentation in the reservoirs of the Volga Cascade]. Doctor of Sciences in Geography thesis abstract. Moscow, Russia, 39 p. (In Russian).
- Zakonnov, V.V., Poddubnyy, S.A., Zakonnova, A.V., 2026. Struktura dna Ribinskogo vodochranilishcha i ego transformatiya [The structure of the bottom of the Rybinsk Reservoir and its transformation]. *Ekosistem Transformation* **9** (1) (in press). (In Russian).
- Zakonnova, A.V. Klimaticheskie izmeneniya termicheskogo regima Ribinskogo vodochranilishcha [The effect of climate change on the thermal Regime in the Rybinsk reservoir]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina [Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS]* **94** (97), 7–16. (In Russian).