

## Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги Сообщение 7. Формирование наносов в высокопроточных водохранилищах Волжского каскада

В.В. Законнов  , А.В. Законнова , А.И. Цветков 

 zak@ibiw.ru

ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина  
Российской академии наук», пос. Борок, Ярославская обл., Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Крупные равнинные водохранилища характеризуются как водоемы замедленного водообмена с коэффициентами  $K_b$  менее  $10 \text{ год}^{-1}$ , осуществляющие многолетнее (годовое) регулирование стока. К этому типу относятся все водохранилища Волжско-Камского каскада, за исключением Чебоксарского и Саратовского с  $K_b$  около  $20 \text{ год}^{-1}$ . В них наблюдаются недельные и суточные колебания стока. Такой режим эксплуатации гидроузлов приводит к увеличению проточности и уровневым флуктуациям, что определяет специфические условия формирования и накопления донных осадков, свойственные речным системам. Рассматриваемые водохранилища являются транзитными для взвешенных веществ и аэроторами по окислению химических поллютантов и их нейтрализации, поэтому им принадлежит важнейшая роль в естественном самоочищении и управлении качеством природных вод.

**Методы.** Работа выполнена по стандартным общепринятым методикам, апробированным на водохранилищах Верхней Волги. Дана оценка качества воды и донных отложений различных по гидроморфометрии, динамике водных масс и режимам эксплуатации водохранилищ с помощью методов биотестирования и токсикологии на примере личинок хирономид и системы антиоксидантной защиты бентосоядных рыб.

**Результаты.** На основании данных комплексных гидробиологических рейсов в вегетационный период 2014–2020 гг. представлена характеристика пространственно-временной трансформации нижнего яруса экосистемы водоемов с высоким водообменом (на примере Чебоксарского и Саратовского водохранилищ) и выявлена ее роль в самоочищении воды с учетом биомаркеров. В современный период площади крупнозернистых наносов составляют 55 % в Чебоксарском и 70 % в Саратовском водохранилище. Показано, что качество воды по показателям цветности, прозрачности и количеству взвешенных наносов улучшается.

© Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., 2021

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Чебоксарское и Саратовское водохранилища, проточность, наносы, мониторинг, трансформация, седиментационный баланс, качество воды.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100104-6 и приоритетного проекта «Оздоровление Волги» № АААА-А18-118052590015-9.

**Для цитирования:** Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 7. Формирование наносов в высокопроточных водохранилищах Волжского каскада // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 29–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-2.

Дата поступления 28.12.2020.

## SPATIAL-TEMPORAL TRANSFORMATION OF THE VOLGA RESERVOIRS' SOIL COMPLEX.

### COMMUNICATION 7. SEDIMENT FORMATION IN THE HIGHLY RUNNING RESERVOIRS OF THE VOLGA CASCADE

Viktor V. Zakonnov  , Arina V. Zakonnova , Aleksandr I. Tsvetkov 

 zak@ibiw.ru

*Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology,  
pos. Borok, Yaroslavl Oblast, Russia*

#### ABSTRACT

**Significance.** Large plain reservoirs are water bodies of a slow water exchange with  $K_w$  less than 10 year<sup>-1</sup> contributing to multi-year (annual) flow regulation. All reservoirs of the Volga-Kama cascade belong to this type of reservoirs, except the Cheboksary and Saratov reservoirs with  $K_w$  about 20 year<sup>-1</sup>. Weekly and daily fluctuations of the runoff are observed in these reservoirs. This mode of operation of hydraulic constructions leads to an increase in the flow rate and fluctuations of the level, which determines the specific conditions for the formation and accumulation of bottom sediments characteristic of river systems. It is shown that the areas of coarse-grained sediments are 55 and 70%, respectively. The reservoirs under consideration are transit reservoirs for suspended substances and aerators for the oxidation of chemical pollutants and their neutralization, so they play a crucial role in the natural self-purification and management of natural water quality. **Methods.** The aim of the study is to characterize the spatial and temporal transformation of the lower layer of the ecosystem in reservoirs with high water exchange (by the example of the Cheboksary and Saratov reservoirs) and to identify its role in water self-purification taking into account biomarkers. It is known that river systems or systems similar to them are more efficient and are characterized as potentially saturated with food organic/mineral resources for hydrobionts. The assessment of water quality and bottom sediments of different hydro-morphometric characteristics, dynamics of water masses and operating conditions is presented using methods of bioassay and toxicology by the example of chironomid larvae and antioxidant defense system of benthic fish. **Results.** Based on the data of the integrated hydrobiological cruises during the growing season 2014–2020, it is difficult to

say that the quality of water and bottom sediments, biotic and toxicological parameters depend on the flow rate, so further studies are required.

The work is original, because there are no analogues in the world for monitoring of bottom sediments in reservoirs and quantitative assessment of sedimentation processes in space and time. The results of the biogeochemical analysis indicate, that in terms of the degree of deterioration of the eco/toxicological state, the Volga reservoirs are in a series: Volgograd = Saratov > Kuibyshev > Cheboksary > Gorky.

**Keywords:** Cheboksary and Saratov reservoirs, flow rate, sediments, monitoring, transformation, sedimentation balance, water quality.

**For citation:** Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I. Spatial-temporal Transformation of the Volga Reservoirs' Soil Complex. Communication 7. Sediment Formation in the Highly Running Reservoirs of the Volga Cascade. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2021, No. 4. P. 29–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-2.

**Financing:** The work has been done in the framework of the state assignment No.121051100104-6 and «The Volga enhancement» priority project No. AAAA-A18-118052590015-9.

Received December 28, 2020.

## ВВЕДЕНИЕ

Опыт мониторинговых исследований грунтового комплекса Чебоксарского водохранилища с момента его заполнения в 1981 г. и через последующие 10 лет оказался уникальным для объяснения седиментационных процессов в Саратовском водохранилище, где гидрологические съемки носили эпизодический характер: 1968 г. – рекогносцировка, затем 1985, 1990, 2006 и 2014–2020 гг. [1–3]. Описываемые процессы в Чебоксарском в целом подтверждаются в Саратовском водохранилище [4].

Цель исследования – дать характеристику пространственно-временной трансформации нижнего яруса экосистемы водоемов с высоким водообменом (на примере Чебоксарского и Саратовского водохранилищ) и выявить ее роль в самоочищении воды с учетом биомаркеров.

Высокая проточность, характерная для обоих водохранилищ, способствует процессам самоочищения водоемов от вредных поллютантов. Чебоксарское водохранилище является естественным регулятором восстановления качества природных вод для бассейна Верхней Волги, а Саратовское – для Средней Волги и Камского каскада.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Саратовское водохранилище коренным образом отличается от других техногенных водоемов Волги. В нем не накапливается запас воды, сохраняемый на длительное время. По гидрологическим характеристикам водохранилище напоминает медленно текущую реку. В районе Жигулей р. Вол-

га образует крутую излучину, называемую Самарской Лукой. Здесь Волга огибает Жигули и прорывается через Жигулевские ворота, где оба берега высокие и сложены известковисто-доломитовыми отложениями каменноугольного возраста, далее низкое левобережье состоит из лессовидных пород и эоловых песков.

В связи с отсутствием подробной проектной документации, Саратовское водохранилище не разделено на районы и участки, поэтому расчеты проводились для всего водохранилища. В данной работе использованы материалы детальных грунтовых съемок 1985 г. и 2014–2020 гг., а также специальных съемок 1990 г. и 2006 г., в ходе которых определялась толщина вторичных песков на мелководьях в районах подмыва и разрушения берегов, сложенных лессовидными супесями. На основании гранулометрического анализа ситовым методом на установке «Analysette-3» (Alfred Fritsch & CO, Германия) установлено, что вторичные пески, подвергшиеся гидродинамическому воздействию (в виде стоково-ветровых течений и волн), имеют определенную гидравлическую крупность, которая отличается от механического состава береговых склонов. Как правило, механический состав состоит из двух- и трехвершинных пиков распределения – песка, алеврита и пелитового материала. Пробы для анализов отбирали из кернов берегового откоса, полосы прибоя и через 1 м глубины от уреза до тальвега по всей зоне распределения песчаных наносов. Вторичный осадочный материал представлял собой одну фракцию, соответствующую размывающей скорости течения в виде одного пика с высокой сортировкой  $S_0 < 2$ , характерной для данного разреза. Среднюю толщину слоя вторичного песка рассчитывали по трансекте для отдельных участков. По водохранилищу она составила 12,3 см (5–25), илистого песка – 7,2 см (3–15).

Методика определения толщины вторичных песчаных наносов использована на всех исследуемых водохранилищах Волжского каскада. При проведении гидробиохимических исследований 2014–2020 гг. на экспедиционном судне «Академик Топчиев» определены тип и толщина донных отложений на восьми стандартных станциях и пяти разрезах (пять станций на каждом), всего – 196 станций.

Гидробиохимические показатели определяли по судовому ходу с помощью датчиков портативных измерений YSI-85, YSI Pro ODO (YSI, I<sub>nc</sub>, USA) с автоматической записью на компьютере (цветность, град; прозрачность, см; взвешенное вещество, мг/л; растворенный кислород, мг/л), а также методами химического анализа и биодиагностики [5, 6]. Методики по отбору, распределению и накоплению донных отложений и ошибкам анализов приведены в сообщении 1 [4].



**Рис. 1.** Экспедиционное судно ИБВВ РАН «Академик Топчиев».  
Fig. 1. RAN IIWB expedition vessel «Akademik Topchiev».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После заполнения Куйбышевского (1955 г.) и Волгоградского (1958 г.) водохранилищ было завершено создание промежучного – Саратовского (1967 г.), отличающегося повышенным водообменом ( $K_B=18,2 \text{ год}^{-1}$ ), соизмеримым с Чебоксарским ( $K_B=19,8 \text{ год}^{-1}$ ). Основное назначение Саратовского водохранилища – обеспечивать недельное и суточное регулирование стока с одинаковыми попусками как через Тольяттинский, так и Балаковский гидроузлы. Уровень воды в водохранилище постоянно поддерживается на отметке, близкой к 28 м БС.

Первые гидроморфометрические характеристики водохранилища и структура дна приведены за 1968–1971 гг.: глубины от 0 до 2 м составляли 21,1 %, от 2 до 5 м – 25 %, от 5 до 10 м – 25,3 %, более 10 м – 28,1 %, площадь водной поверхности 1950 км<sup>2</sup> [7, 8]. По данным Гидропроекта (1960 г.) около 40 % площади дна занимали окультуренные земли, остальное – лес, кустарники, прочие угодья и водоемы [8]. Однако в последующих литературных источниках с 1978 г. фигурирует площадь 1833 км<sup>2</sup> со средней глубиной 7,3 м [9, 10].

В первое десятилетие существования Саратовского водохранилища произошло сокращение акватории примерно на 120 км<sup>2</sup>, что, возможно, связано с ошибкой расчета или, что более вероятно, с активизацией геоморфологических процессов на берегах и в ложе, лавинной седиментацией осадочного материала в мелководной зоне. Аналогичная картина наблюда-

лась в Чебоксарском водохранилище в течение первого десятилетия и даже на двадцатом году функционирования водоема [11]. В связи с предполагаемым повышением уровня до 68 м БС, процессы формирования нижнего яруса Чебоксарского водохранилища еще не закончены, а в Саратовском он сформировался к 1985 г., находясь в прямой зависимости от расходов воды через гидроузлы и скоростного режима по судовому ходу (табл. 1).

Практически половина длины водохранилища (180 км) представляет реку со скоростями течения, превышающими 0,40 м/с (0,44–1,60), при которых происходит размыв ложа и берегов, приводящий к уменьшению площади акватории и формированию крупнозернистых наносов. Скорость стокового течения максимальна по судовому ходу, приуроченному к затопленному руслу Волги. По трансектам от тальвега к берегам она уменьшается, но увеличивается ветро-волновое воздействие на дно, что приводит к накоплению в прибрежной зоне крупных песчано-алевритовых фракций с образованием пересыпей и валов, которые со временем становятся урезами и новыми границами водохранилища. Этот процесс характерен для всех водохранилищ Волги, в которых происходит спрямление берегов, выравнивание ложа и отчуждение суши акватории, в т. ч. за счет срастания с дном макрофитных сплавин и перехода их в заболочиваемые ландшафты с гидроморфным почвообразованием. В результате площадь мелководий в Саратовском водохранилище сократилась на 82 км<sup>2</sup> [8, 10].

**Таблица 1.** Сведения о течениях в Саратовском водохранилище [12]  
Table 1. Data on currents at the Saratov Reservoir [12]

Расход воды через ГЭС, тыс. м <sup>3</sup> /с	Средняя скорость течения на участке, м/с			
	Моркваши– Ширяево	Ширяево– Самара	Самара– Сызрань	Сызрань – Балаково
4	0,80	0,48	0,28	0,10
8	1,06	0,80	0,60	0,18
12	1,28	1,06	0,80	0,20
16	1,46	1,26	1,00	0,34
20	1,60	1,45	1,20	0,44

На нижнем участке Сызрань–Балаково скорости течения резко уменьшаются, что приводит к процессам трансидемтациии и накопления тонкодисперсных отложений – песчаных и глинистых илов по затопленному руслу Волги и в устьевых участках левых притоков рек Чагра и Малый Ир-



гиз. Состав нижнего яруса идентифицирован по современной классификации, динамика площадей основных типов грунтов представлена в табл. 2.

Формирование грунтового комплекса равнинных водохранилищ в начальный период (10–20 лет) соответствует активизации эрозионно-абразионных процессов и повышенных темпов седиментации (табл. 2, табл. 3). В этот период закладываются основные ареалы всех типов донных отложений, которые впоследствии изменяются незначительно (пассивная стадия – стабилизация), что позволяет с высокой вероятностью спрогнозировать (по аналогии с другими водохранилищами, время эксплуатации которых составляет 80 лет), их площади к 100-летию существования техногенных водоемов.

**Таблица 2.** Трансформация площадей грунтового комплекса

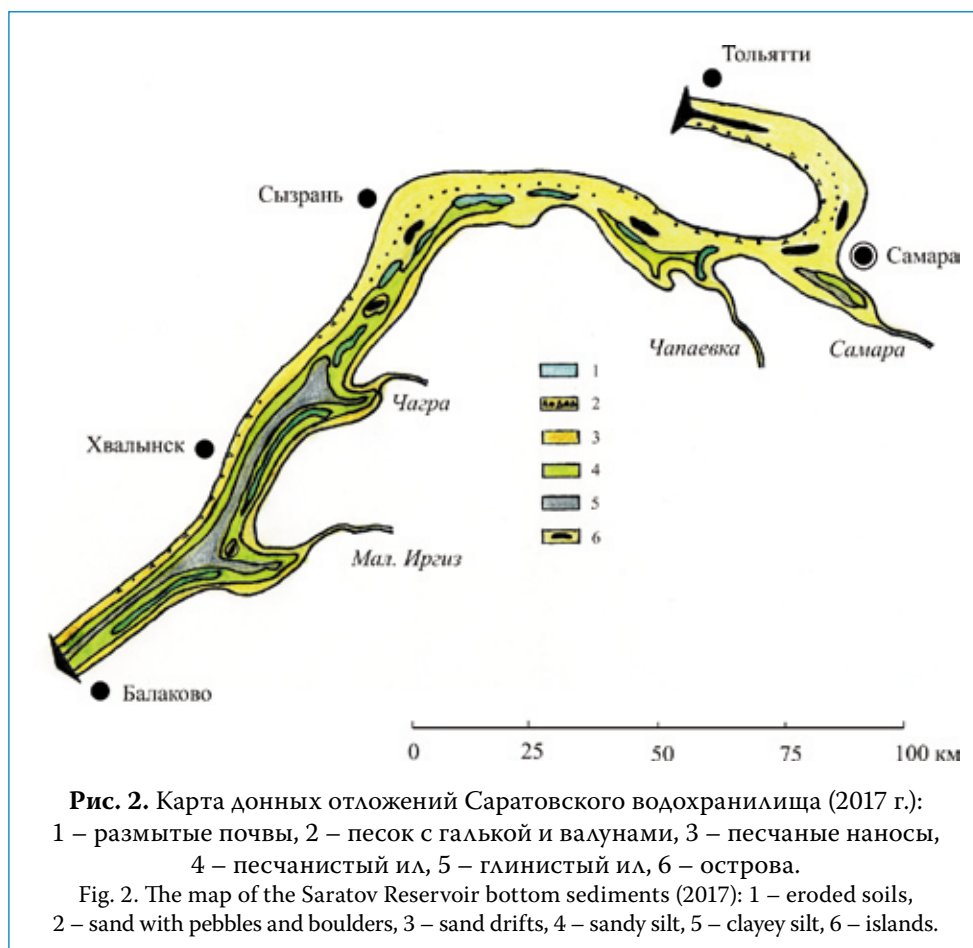
(по годам гидрологических съемок), %  
Table 2. Transformation of the soil complex areas  
(according to years of hydrological surveys), %

Тип грунта донных отложений	1967 г.	1968 г. [7]	1971 г. [8]	1985 г. [1]	2006 г.	2017 г.	2067 г. (прогноз)
Трансформированные грунты (почвы)	(99)	49	15	20	15	12	10
Крупнозернистые наносы	0,8	48	80	70	70	70	70
Тонкодисперсные Отложения	0,2	3	5	10	15	18	20

*Примечание:* в скобках – почвы до заполнения водохранилища.

По результатам первых съемок на участке от Самарской Луки до г. Хвалынска русловая и левобережная части дна были заняты песками, местами – размытыми супесчаными и суглинистыми почвами, правобережная – валунами, крупной галькой, гравием и песком. На нижнем участке (Хвалынский–Балаково) пески сменялись илистым песком и песчаным илом, а в бывших затопленных старицах и пойменных озерах – глинистым илом.

Последующие исследования показали, что интенсивность образования вторичных донных отложений за счет сокращения площадей трансформированных грунтов увеличилась незначительно. При этом площади илонакопления выросли в результате продвижения глинистых отложений вверх по течению от г. Хвалынска до г. Сызрани в зоне закрытого островами левобережья с обильной водной растительностью и донными отложениями из отмерших макрофитов (рис. 2).



**Таблица 3.** Интенсивность осадконакопления по годам и периодам между съемками

Table 3. Intensity of sediments accumulation in terms of years and periods between surveys

Характеристика		1971/4	1985/18	2006/39	2017/50	2067/100
Средняя толщина слоя, см		2,4	5,6	10,5	14,2	25,0
Скорость седиментации, мм/год	средняя многолетняя	6,0	3,1	2,7	3,2	2,5
	по периодам	6,0	2,4	2,3	3,6	2,1



Количественное выражение осадкообразующих процессов представлено в табл. 4. Несмотря на высокую проточность интенсивность осаждения наносов одна из высоких в каскаде [2, 13]. Всего к 2017 г. на дне Саратовского водохранилища накопилось 2,6 км<sup>3</sup> вторичных донных отложений весом около 2924 млн т., из которых илистые отложения составляют 54 % объема и 34 % массы. Водохранилище является по существу накопителем крупнозернистых наносов – валунов, гальки и песка, образовавшихся в результате размыва берегов и дна. Тонкодисперсные взвеси аллохтонного и автохтонного происхождения проносятся транзитом. Седиментация последних происходит на участке Сызрань-Балаково в закрытых от волнения заостровных пространствах, где преобладает отстойный эффект.

**Таблица 4.** Интенсивность осадкообразования в Саратовском водохранилище к 2017 г.

Table 4. Intensity of sediments formation in the Saratov Reservoir by 2017

Тип грунта, донные отложения	Площадь, км <sup>2</sup>	Средняя толщина, см	Объем, км <sup>3</sup>	Масса, млн т	Скорость седиментации, год <sup>-1</sup>		
					мм	млн т	кг/м <sup>2</sup>
Трансформированный грунт	220	–	–	–	–	–	–
Валуны, галька	245	–	–	–	–	–	–
Песок	846	12,3	1,04	1770	2,5	35,4	4,2
Илистый песок	210	7,2	0,15	166	1,4	3,3	1,6
Песчанистый ил	212	45,0	0,95	763	9,0	15,3	7,2
Глинистый ил	100	44,9	0,45	225	9,0	4,5	4,5
Тип осадкообразования							
Занесение	1833	14,2	2,6	2924	2,8	58,5	3,2
Осадконакопление	1368	19,0	2,6	2924	3,8	58,5	4,3
Илонакопление	312	45,0	1,4	988	9,0	20,0	6,4

Особенно четко это наблюдается по интервалам глубин, пересчитанных к 2017 г. (табл. 5). Так, в литоральной зоне от 0 до 4 м отмечен разнообразный набор грунтов от размытых почв до глинистых, песчанистых, макрофитных отложений толщиной 40–50 см. Плащ песчаных наносов имеет

толщину от 5 до 30 см, глубже четырех метров откладываются переходные типы осадков от песков к илам – илистый песок и песчаный ил. Их мощности колеблются в широких диапазонах – от 0,5 см до максимальной 80 см, отмеченной в устье р. Малый Ирғиз. На склоне русловой ложбины 8–12 м заметно увеличилась скорость седиментации тонкодисперсных частиц, чему способствовали подводные оползневые процессы.

**Таблица 5.** Интенсивность осадконакопления

по интервалам глубин к 2017 г.

Table 5. Intensity of sediments accumulation in terms of depth intervals by 2017

Интервал глубин, м	Площадь, км <sup>2</sup>	Средняя толщина, см	Объем, км <sup>3</sup>	Масса, млн т	Скорость седиментации, год <sup>-1</sup>		
					мм	млн т	кг/м <sup>2</sup>
0–4	668	13,2	0,88	1500	2,6	30,0	4,5
4–8	465	12,3	0,57	629	2,5	12,6	2,7
8–12	328	19,5	0,64	512	3,9	10,2	3,1
> 12	372	13,7	0,51	290	2,7	5,8	1,6

В связи с большой проточностью отсутствует свойственное другим водоемам замедленного водообмена увеличение толщины донных отложений с глубиной. В сочетании с морфометрическими особенностями (большие площади мелководий) и активной абразионной деятельностью происходит уменьшение объема и массы осадочного материала от прибрежной к глубоководной части. Однако скорости седиментации на глубинах 0–4, 4–8 и более 12 м практически одинаковы – около 2,6 мм · год<sup>-1</sup>.

**Таблица 6.** Трансформация балансовых характеристик

взвешенных наносов, %

Table 6. Transformation of the suspended sediments balance characteristics, %

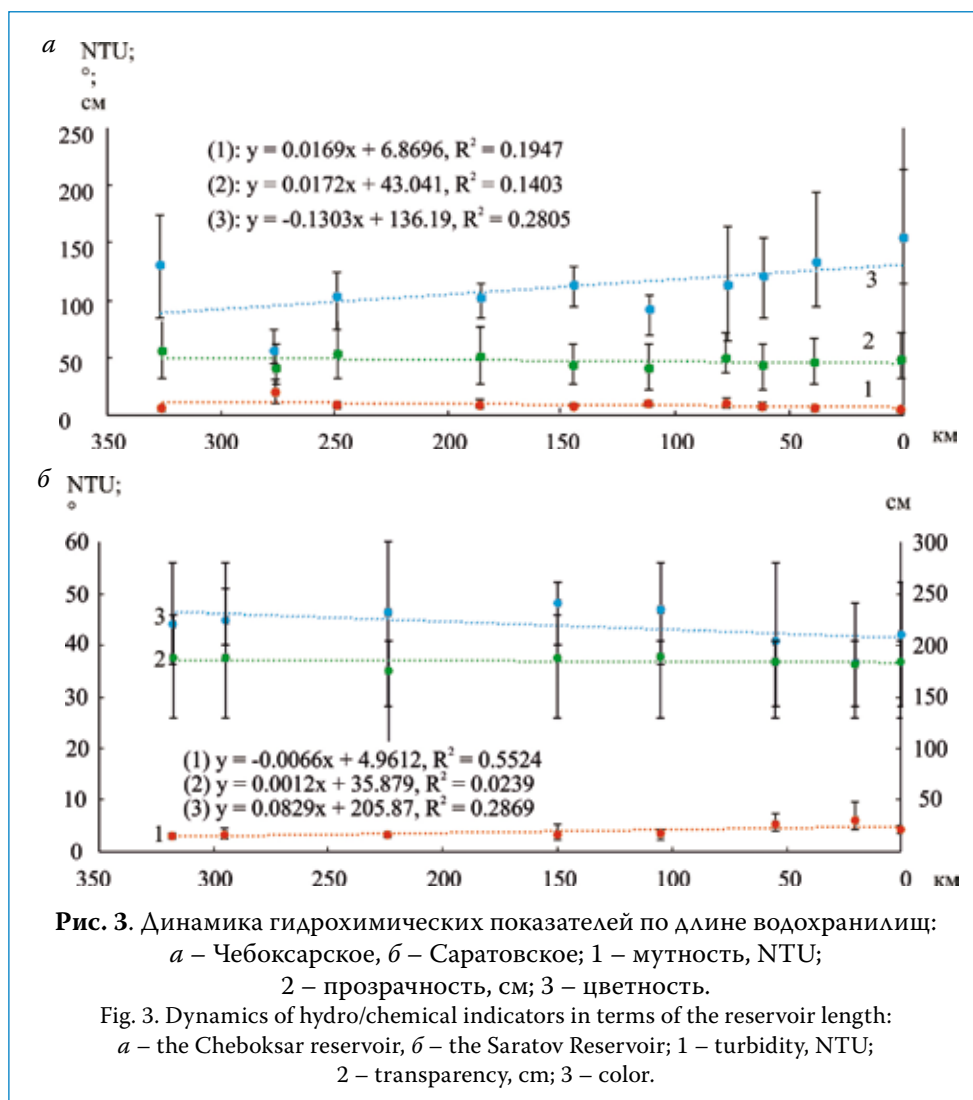
Период, гг.	Приход			Расход	
	Абразионная деятельность	Сток речных наносов	Продукция гидробионтов	Сброс через гидроузлы	Осадконакопление
1967–1985 [2]	57	42	1	40	60
1967–2006 [2]	67	32	1	31	69
2006–2017	69	30	1	29	71

Уточнение ориентировочного седиментационного баланса за последние 10 лет показало, что абразионно-эрозионная деятельность продолжается на прежнем уровне (табл. 6). Несмотря на то что продукция гидробионтов за счет макрофитов заметно выросла, ее доля в балансе осталась одной из низких в системе водохранилищ Волги [2]. Сток речных наносов и сброс вниз по каскаду находятся в пределах многолетних изменений водности. Незначительное суммарное увеличение осадконакопления характерно для всех равнинных водохранилищ независимо от режима эксплуатации.

Гидродинамические процессы, свойственные рекам и нижним (речным) бьефам гидроузлов, в Чебоксарском и Саратовском водохранилищах повлияли не только на формирование и распределение наносов, но и на качество водных ресурсов за счет аккумуляции. Так, содержание органического вещества, биогенных элементов, тяжелых металлов и других химических компонентов увеличивается от зон выклинивания подпора до верхних бьефов гидроузлов по мере изменения гранулометрического состава от крупнозернистых наносов к тонкодисперсным отложениям [2, 3]. Качество воды по показателям цветности, прозрачности и количеству взвешенных веществ также улучшается (рис. 3).

Длина Чебоксарского и Саратовского водохранилищ практически одинакова – 340 и 346 км. Количество промерных станций составило 10 и 8 соответственно. Для Чебоксарского водохранилища километраж по оси ординат начинается от плотины Чебоксарской ГЭС до Городца, а для Саратовского – от Балаковской ГЭС до Тольятти (0–350 км). Так, в многолетнем аспекте (2014–2020 гг.) за вегетационный период цветность практически одинакова ( $R^2=0,28$ ). Небольшое ее увеличение отмечено в Чебоксарском водохранилище за счет притоков рек Суры и Ветлуги, а в Саратовском – уменьшение в результате осветления воды в Куйбышевском водохранилище. По длине водохранилищ увеличивается прозрачность, уменьшается мутность, что сопровождается усилением седиментационных процессов.

Сравнение исследований до создания водохранилищ и в первые четыре года их функционирования показало, что прозрачность в новых условиях возросла от 0,9–1,1 м до 0,8–1,6 м [8]. По растворенному кислороду влияние зарегулированности не имело существенного значения. За весь период наблюдения резкого дефицита  $O_2$  не отмечено. Как в ранних работах, так и в современных, количество растворенного кислорода в Чебоксарском водохранилище по глубине не различается, но уменьшается по длине водоема от 10–8 мг/л до 6,5 мг/л [8, 14]. В Саратовском – его концентрации практически одинаковы от г. Тольятти до г. Балаково (от 8,3–7,4 до 9,0–8,1 мг/л), что связано с уменьшением окисления более чистых вод Куйбышевского водохранилища [14].



В ранних исследованиях (1970–1971 гг.) на Саратовском водохранилище в годовом гидрографе резко выражен майский пик половодья, который превышает летне-осенне-зимнюю межень в 1,5–2 раза [7]. В Чебоксарском пик половодья – размытый из-за неодновременного поступления вод притоков, находящихся в различных географических зонах бассейнов рек Волги, Оки, Суры и Ветлуги [4]. В обоих водохранилищах во время половодья отмечается наименьшая прозрачность и повышенная мутность в приплотинных участках. Поэтому физико-химические показатели ка-

чества воды весной (в пик половодья) и во время осенне-зимних паводков максимальны, а в меженный период каких-либо изменений не происходит. Таким образом, водохранилища с высоким водообменом ведут себя как равнинные реки преимущественно со снеговым питанием. Загрязнение рек изменяется от истоков вниз по течению и если нет промежуточных источников промышленно-бытовых и сельскохозяйственных сточных вод, то в речной системе происходит разбавление и уменьшение концентраций за счет увеличения расходов воды или больших объемов водоприемных емкостей.

Наиболее результирующей характеристикой качества природных вод являются рыбохозяйственные нормативы и сравнительная оценка с эталонными биологическими объектами. Биотестированием установлено, что на большинстве станций Средней и Нижней Волги, за исключением фоновой станции в Рыбинском и на двух станциях в Чебоксарском и Саратовском водохранилищах, расположенных в типично речных нижних бьефах, донные осадки обладали хроническим токсическим действием по отношению к личинкам хирономид: их смертность была >30 % и наблюдалось статистически значимое снижение линейных размеров [5].

Химический анализ значений биомаркеров показал, что в печени лебля и показателях токсичности донных отложений Горьковского водохранилища отражается активизация хронического оксидативного стресса и повышенная эффективность системы антиоксидантной защиты, что указывает на неблагоприятное качество среды обитания [6]. В Чебоксарском водохранилище у рыб регистрируется частичное проявление стресса в нормальном режиме, и не доходит до полного истощения ресурсов. Исходя из этого, можно предположить, что в этом водохранилище условия обитания рыб лучше, чем в Горьковском. В Куйбышевском водохранилище все параметры у рыб были в статистических пределах фоновых значений, что свидетельствует о более благоприятной экологической ситуации (в основном за счет большого объема водоема – 52,5 км<sup>3</sup>). В Саратовском водохранилище биомаркер интенсивности образования активных форм кислорода не отличался от эталонных значений, что не позволяет развиваться оксидативному стрессу и указывает на благополучное состояние среды для рыб. В Волгоградском водохранилище интенсивность образования активных форм кислорода в тканях была ниже, чем во всех вышеперечисленных водных объектах, тем не менее, состояние среды обитания рыб благополучное. Данные анализа свидетельствуют, что водохранилища Волги по степени ухудшения экотоксикологического состояния находятся в ряду: Волгоградское = Саратовское > Куйбышевское > Чебоксарское > Горьковское [6].

Следует отметить, что прямой корреляции между изменением значений биомаркеров оксидативного стресса и уровнем содержания тяжелых металлов не выявлено, но прослеживается тенденция их связи с суммарной нагрузкой [6]. Кроме того, следует иметь в виду, что органические токсические вещества и другие антропогенные факторы влияют на значения биохимических маркеров и могут привести к развитию окислительного стресса [15].

В работе использовано сравнительно новое направление исследований для водоемов рыбохозяйственного назначения по определению качества воды с применением биомаркеров и эффективности оксидативного стресса на рыбах-бентофагах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выявлено, что в Чебоксарском и Саратовском водохранилищах с высокой проточностью и турбулентной диффузией наблюдается крупномасштабное естественное самоочищение вод Волжско–Камского каскада, подверженного антропогенному загрязнению с высокопромышленной и густонаселенной Европейской территории России. Функцию очистки загрязненных вод принимают на себя естественные процессы самоочищения водных экосистем. В этой ситуации речные или близкие к ним системы являются более эффективными и характеризуются как потенциально насыщенные пищевыми органоминеральными ресурсами для гидробионтов. Одной из особенностей функционирования гидробиотической системы самоочищения воды является синэкологическая кооперативность физических, физико-химических, химических и биологических факторов и процессов [16].

На основе анализа данных комплексных гидробиологических исследований по водохранилищам Волжско–Камского каскада в навигационный период 2014–2020 гг. еще трудно утверждать, что качество воды и донных отложений, трофический статус, видовой состав, биомасса гидробионтов, биотические и токсикологические показатели напрямую зависят от проточности (водообмена) отдельных участков и в целом водохранилищ [3, 5, 6, 14]. Потребуется дальнейшие усилия по организации многолетнего мониторинга экосистем водохранилищ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Законнов В.В., Зиминова Н.А. Распределение и накопление донных отложений в водохранилищах Нижней Волги // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. С. 40–46.
2. Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 39 с.



3. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
4. Законнов В.В., Комов В.Т., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 1. Донные отложения и их изменения в связи с повышением уровня Чебоксарского водохранилища. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 3. С. 4–19. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-1.
5. Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волги по показателям токсичности и химического состава // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук. 2018. Вып. 82 (85). С. 107–131.
6. Чуйко Г.М., Гапеева М.В., Ложкина Р.А., Законнов В.В., Томилина И.И., Алексеева М.А., Урванцева Г.А. Комплексная оценка экотоксикологического состояния водохранилищ Средней и Нижней Волги методом биодиагностики и анализа содержания тяжелых металлов в донных отложениях // Антропогенное влияние на организмы и водные экосистемы: сб. материалов VII Всеросс. конф. по водной токсикологии. Ярославль: Филигрань, 2020. С. 224–226.
7. Нечваленко С.П. Донная фауна в первые четыре года после заполнения водохранилища // Саратовское водохранилище. Гидрохимический режим, кормовая база и состояние запасов рыб: Тр. Саратовского отд. ГосНИОРХ. Т. XII. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1973. С. 94–103.
8. Сиденко В.И. Некоторые сведения о гидрологических и гидрохимических условиях Саратовского водохранилища в годы его становления (1968–1971) // Тр. Саратовского отд. ГосНИОРХ. Т. XII. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1973. С. 23–39.
9. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 270 с.
10. Волга и ее жизнь. Л.: Наука, 1978. 348 с.
11. Законнов В.В., Иванов Д.В., Законнова А.В., Кочеткова М.Ю., Маланин В.П., Хайдаров А.А. Пространственная и временная трансформация донных отложений водохранилищ Средней Волги // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 5. С. 573–582.
12. Атлас Единой глубоководной системы Европейской части РСФСР. М.: ГУГК, 1988. Т. 6. 19 с.
13. Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Известия РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–112.
14. Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук. 2018. Вып. 81 (84). С. 47–84.

15. Lushchak V.J. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals // *Aquatic Toxicology*. 2011. Vol.101. Js.1. P. 13–30.
16. Остроумов С.А. О самоочищении водных экосистем // *Антропогенное влияние на водные экосистемы*. М.: МГУ, 2005. С. 94–119.

#### REFERENCES

1. Zakonnov V.V., Ziminova N.A. Raspreделение i nakoplenie donnykh otlozhenii v vodokhranilishchakh Nighei Volgi [Distribution and accumulation of bottom Sediments in the Reservoirs of the Lower Volga] Formirovaniye i dinamika poley gidroloicheskikh i gidrokhimicheskikh kharakteristik vo vnutrennikh vodoyomakh i ikh modelirovaniye [Formation and dynamics of the hydrological and hydro/chemical characteristics fields in inland water bodies and their modeling]. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. P. 40–46 (in Russ).
2. Zakonnov V.V. Osadkoobrazovaniye v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Sedimentation in the Reservoirs of the Volga Cascade]. Avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. M.: IGRAN, 2007. 39 p. (in Russ).
3. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. 2018. Gidroginamichskiye protsessy i ikh rol' v formirovaniyi donnykh osadkov vodokhranilishch Volzhsko-Kamskogo kaskada [Hydro-dynamic processes and their role in formation of the Volga-Kama reservoir cascade bottom sediments]. *Tr. Instituta biologiyi vnutrennikh vod im. I.D. Papanina Rossiyskoy akademiyi nauk* [Works of I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology]. Vyp. 81 (84). P. 35–46 (in Russ).
4. Zakonnov V.V., Komov V.T., Zakonnova A.V. Prostranstvenno-vremennaya transformatsiya gruntovogo kompleksa vodokhranilishch Volgi. Soobshcheniye 1. Donnyye otlozheniya i ikh izmeneniya v svyazi s povysheniyem urovnya Cheboksarskogo vodokhranilishcha [Spatial-temporal transformation of the Volga reservoirs' soil complex. Communication 1. Bottom sediments and their changes caused by the Cheboksary Reservoir level raising]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: Problemy, Tekhnologiyi, Upravleniye* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2015. No. 3. P. 4–19 (in Russ).
5. Tomilina I.I., Gapeeva M.V., Logkina R.A. Otsenka kachestva vody i donnykh otlozheniy kaskada vodokhranilishch reki Volgi po pokazatelyam toksichnosti i khimicheskogo sostava. *Tr. Instituta biologiyi vnutrennikh vod im. I.D. Papanina Rossiyskoy akademiyi nauk* [Works of I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology]. Vyp. 82 (85). P. 107–131 (in Russ).
6. Chuiko G.M., Gapeeva M.V., Lozhkina R.A., Zakonnov V.V., Tomilina I.I., Alekseeva M.A., Urvantseva G.A. Kompleksnaya otsenka ekotoksikologicheskogo sostoyaniya vodokhranilishch Sredney i Nizhney Volgi metodom biodiagnostiki i analiza sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh [Comprehensive assessment of the ecotoxicological state of reservoirs in the Middle and Lower Volga by the method of biodiagnosics and analysis of the content of heavy metals in bottom sediments]. *Antropogennoye vliyaniye na organizmy i vodnyye ekosistemy: sbornik materialov VII Vserossiyskoy konferentsii po vodnoy toksikologii* [Anthropogenic impact upon organisms and aquatic ecosystems collection of proceedings of VII All-Russian Conference on Aquatic toxicology]. Yaroslavl: Filigran', 2020. P. 224–226 (in Russ).
7. Nechvalenko S.P. Donnaya fauna v pervye chetyre goda posle zapolneniya vodokhranilishcha [Bottom fauna in the first four years after filling the reservoir]. *Saratovskoye vo-*

- dokhranilishche. Gidrokhimicheskiy rezhim, kormovaya baza i sostoyaniye zapasov ryb* [The Saratov Reservoir. Hydro/chemical regime, nutrition base and fish stock status]. Tr. Saratovskogo otd. GosNIORKH. T. XII. Saratov: Privolzhskoye knizhnoye izd-vo, 1973. P. 94–103 (in Russ).
8. Sidenko V.I. Nekotoryye svedeniya o gidrologicheskikh i gidrokhimicheskikh usloviyakh Saratovskogo vodokhranilishcha v gody yego stanovleniya (1968–1971) [Some information about the hydrological and hydrochemical Conditions of the Saratov Reservoir during its formation (1968–1971)]. Tr. Saratovskogo otd. GosNIORKH. Vol. XII. Saratov: Privolzhskoye knizhnoye izd-vo, 1973. P. 23–39 (in Russ).
  9. Gidrometeorologicheskiy rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Kuybyshevskoye i Saratovskoye vodokhranilishcha [Hydrometeorological Regime of Lakes and Reservoirs in the USSR. Kuibyshevskoe and Saratovskoe Reservoirs]. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 270 p. (in Russ).
  10. Volga i yeye zhizn' [Volga and its Life ]. L.: Nauka, 1978. 348 p. (in Russ).
  11. Zakonnov V.V., Ivanov D.V., Zakonnova A.V., Kochetkova M.YU., Malanin V.P., Khaydarov A.A. Prostranstvennaya i vremennaya transformatsiya donnykh otlozheniy vodokhranilishch sredney Volgi [Spatial-temporal transformation of bottom sediments of the Middle Volga Reservoirs]. *Vodniye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34. No. 5. P. 573–581.
  12. Atlas Yedinoy glubokovodnoy sistemy Yevropeyskoy chasti RSFSR [Atlas of the Unified deep-water System of the European Part of the RSFSR]. M.: GUGK. 1988. Vol. 6. 19 p. (in Russ).
  13. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. Geograficheskaya zonal'nost' osadkoobrazovaniya v sisteme volzhskikh vodokhranilishch [Geographical Zoning of Sediment Formation in the System of the Volga Reservoirs]. *Izvestiya RAN. Ser. geogr.* 2008. № 2. P. 105–112 (in Russ).
  14. Lazareva V.I., I.E. Stepanova, A.I. Tsvetkov, Ye.G. Pryanichnikova, S.N. Perova. Kislorodnyy rezhim vodokhranilishch Volgi i Kamy v period potepleniya klimata: posledstviya dlya zooplanktona i zoobentosa [The oxygen regime of the Volga and Kama Reservoirs during climate warming: Impact on Zooplankton and Zoobenthos]. Tr. Instituta biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina Rossiyskoy akademii nauk [Works of I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology]. 2018. Vyp. 81 (84). P. 47–84 (in Russ).
  15. Lushchak V.J. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic toxicology*. 2011. Vol.101. Js.1. P. 13–30.
  16. Ostroumov S.A. O samoochishchenii vodnykh ekosistem [On self-purification of aquatic ecosystems] // Antropogennoye vliyaniye na vodnyye ekosistemy [Anthropogenic impact upon aquatic ecosystems]. M.: MGU, 2005. P. 94–119 (in Russ).

#### Сведения об авторах:

**Законнов Виктор Васильевич**, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок; ORCID: 0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

**Законнова Арина Васильевна**, научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок; ORCID: 0000-0002-1508-1224; e-mail: zak@ibiw.ru

**Цветков Александр Игоревич**, научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок; ORCID: 0000-0002-0307-9864; e-mail: cai@ibiw.ru

**About the authors:**

Viktor V. Zakonnov, Doctor of Geographical Sciences, Chief Researcher, Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, pos. Borok, Nekouzskiy r-n, Yaroslav Oblast, 152742, Russia; ORCID: 0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

Zakonnova Arina Vasilyevna, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, pos. Borok, Nekouzskiy r-n, Yaroslav Oblast, 152742, Russia; ORCID: 0000-0002-1508-1224; e-mail: zak@ibiw.ru

Tsvetkov Aleksandr Igorevich, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, pos. Borok, Nekouzskiy r-n, Yaroslav Oblast, 152742, Russia; ORCID: 0000-0002-0307-9864; e-mail: cai@ibiw.ru