УДК 556.557

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76

Обзорная статья / Review paper

Гидроэкологические аспекты осадкообразования в водоемах Европейской территории России

В. В. Законнов

zak@ibiw.ru

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской Академии наук, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья содержит краткий обзор исследований пространственно-временной трансформации грунтового комплекса водохранилищ Волги, опубликованных в журнале «Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление» с 2015 по 2022 г. и дающих исчерпывающий ответ на гидроэкологические аспекты и особенности осадкообразования в водохранилищах Волжского каскада и озерах, подвергшихся техногенному воздействию на Европейской территории России. **Методы.** Работа выполнена по стандартным географическим методам изучения экосистем внутренних водоемов. **Результаты.** На основании исследований: разработана схема происхождения и формирования грунтового комплекса равнинных водохранилищ; упрощена классификация подводных грунтов на генетическом уровне; рассчитаны нанософормирующие гидродинамические характеристики; составлены карты нижнего яруса экосистем водохранилищ; оценены количественно интенсивность осадконакопления, объем и вес донных осадков; выявлена широтная географическая зональность темпов осадконакопления в водохранилищах Волги и озерах Северо-Запада России; определены седиментационные балансы взвешенных наносов и их динамика; оценена роль илонакопления как главного гидроэкологического седиментационного депонирующего фактора самоочищения воды при физико-химическом и биологическом взаимодействии; выявлены изменения проектных характеристик и составлены ситуационные (по данным мониторинга) прогнозы путей формирования грунтового комплекса к 100-летию водохранилищ Волги. Полученные результаты могут быть использованы гидроэкологами для определения условий осадкообразования, продуктивности и антропогенного загрязнения нижнего яруса экосистем водоемов равнинных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроэкология, донные отложения. осадкообразование, илонакопление, водохранилища, озера Европейской территории России.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Законнов В. В. Гидроэкологические аспекты осадкообразования в водоемах Европейской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 61–76; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76; EDN: GFAQHR

© Законнов В. В., 2026

Hydroecological aspects of sediment formation in water bodies of the European territory of Russia

Viktor V. Zakonnov

zak@ibiw.ru

Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Russia, 152742, Yaroslav Oblast, Nekouzskiy r-n, pos. Borok

ABSTRACT

Relevance. The article provides a brief overview of the studies "Spatial and temporal transformation of the sediment complex in the Volga reservoirs" published in the journal "Water Sector of Russia: problems, technologies, management" (from 2015 to 2022), which gives an exhaustive answer to the hydroecological aspects and features of sediment formation in reservoirs of the Volga cascade and lakes subjected to the anthropogenic impact on the European territory. **Methods.** The study was conducted according to standard geographic methods for investigating ecosystems of inland water bodies. **Results.** On the basis of these studies: a scheme for the origin and formation of the sediment complex of lowland reservoirs was developed; the classification of underwater ground at genetic level was simplified; sediment-forming hydrodynamic characteristics were calculated; maps of the lower tier of reservoir ecosystems were compiled; the rate of sediment accumulation, and the volume and weight of bottom sediments were quantified; a latitudinal geographic zonation of sedimentation rates in the Volga reservoirs and lakes of Northwest Russia was revealed; sedimentation balances of suspended sediments and their dynamics were determined; the role of silt accumulation as the main hydroecological sediment-depositing factor in water self-purification under physical and chemical and biological interactions was assessed; changes in the design parameters were identified, and situational (according to the monitoring data) forecasts were prepared for the pathways of formation of the sediment complex toward the 100th anniversary of the Volga reservoirs. The results obtained can be used by hydroecologists to determine the conditions of sediment formation, productivity and anthropogenic pollution of the lower tier of ecosystems of reservoirs in lowland territories.

KEYWORDS: hydroecology, bottom sediments, sediment formation, silt accumulation, reservoirs, lakes of the European part of Russia.

FUNDING: The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation (theme No. 124032100076-2).

FOR CITATION: Zakonnov V. V. Hydroecological aspects of sediment formation in water bodies of the European territory of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 61–76; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76; EDN: GFAQHR

ВВЕДЕНИЕ

Составной частью геоэкологии – науки об изменении окружающей среды – является гидроэкология, позволяющая на практике минимизировать экологические и экономические ущербы с помощью природных гидрологических процессов и методов управления ими [1]. В термине «гидроэкология»[1], трактуемом как раздел экологии, изучающий водные экосистемы, их структуру и закономерности функционирования, включая взаимодействие между водной средой и обитающими в ней организмами, роль донных осадков не рассматривается. Наиболее корректно определение гидроэкологии приводится в учебном пособии В. Д. Романенко[2]: «Гидроэкология – это биологическая наука, изучающая водные экосистемы и их части как целостную систему взаимодействующих живых (биотических) и неживых (абиотических) компонентов».

Литология, которую на Западе называют седиментологией[3] всегда решала эти проблемы с гидроэкологических позиций. Некоторые исследователи считают, что вопросы, касающиеся условий осадкообразования, выходят за пределы литологии [2]. Однако несомненно, что изучение этих процессов как в настоящем, так и в прошлом необходимо для решения вопросов, связанных с генезисом осадочных пород.

В XXI в. природная среда уже с трудом справляется с антропогенными нагрузками, которые оборачиваются для нее непредсказуемыми последствиями. Изучить эти новые явления в природе и использовать полученные знания по рациональному природопользованию призвана гидроэкология. Поэтому гидроэкологические аспекты осадкообразования в настоящее время приобретают особое значение и актуальность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В обзоре обобщены материалы исследований осадкообразования в водохранилищах Волжского каскада с 1955 по 2025 г., а также в отдельных озерах Европейской территории России за последние 20 лет стандартными географическими методами изучения экосистем внутренних водоемов [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук по праву считается пионером в исследовании нижнего яруса пресноводных экосистем с гидроэкологических и гидробиологических позиций. Здесь впервые разработана и усовершенствована схема происхождения и формирования донных отложений равнинных водохранилищ (рис. 1) [5].

1 Экологический энциклопедический словарь. М.: Изд. Дом «Ноосфера», 1999. 930 с.
2 Романенко В. Д. Основы экологии. Учебник для студентов высших учебных заведений. К.: Генеза, 2004. 664 с.
3 Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

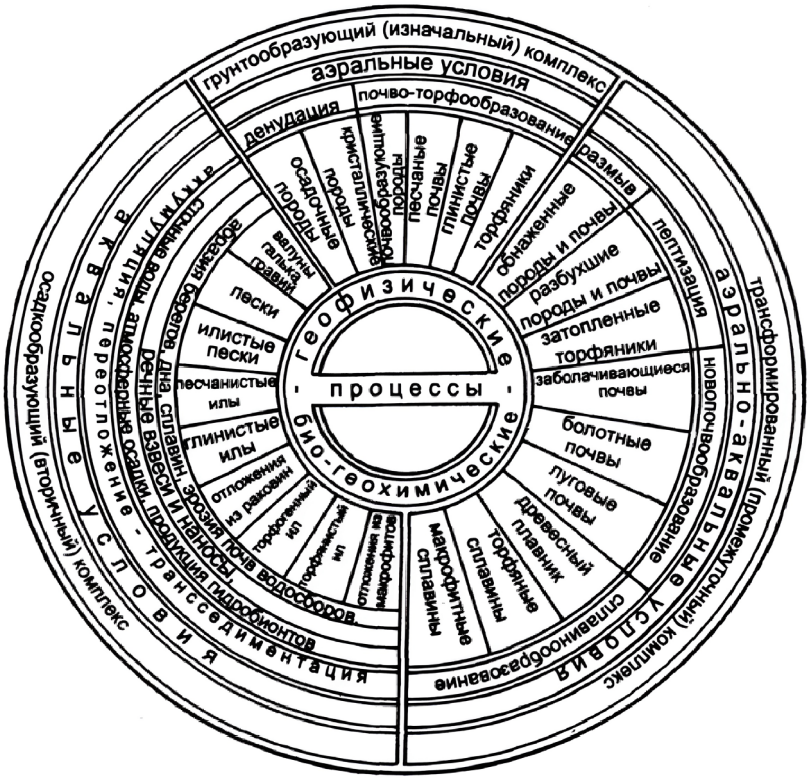


Рис. 1. Схема происхождения и формирования грунтового комплекса равнинных водохранилищ

Fig. 1. Scheme of origin and formation of the groundwater complex of lowland reservoirs

Донный ярус включает широкое разнообразие грунтового комплекса: «первичные» – реликтовые или остаточные породы Палеоволги (скалы, валуны, галечники, пески, глины, торф); «трансформированные» заболачивающиеся и болотно-луговые; и, наконец, почвы – размытые и разбухшие, в том числе «вторичные» – собственно донные осадки – гетеродисперсные минерально-органические крупнозернистые наносы (пески) и тонкодисперсные отложения (илы).

На основе разработанной схемы упрощена классификация грунтов и донных отложений с учетом генетического принципа (табл. 1). Гранулометрический состав и содержание органического вещества являются определяющими для выделения различных типов наносов, что признано многими исследователями [6, 7].

Нанософормирующие характеристики, условно оцениваемые скоростью придонного течения (м/с), рассчитаны по среднему диаметру частиц отдельного образца для всех зон Евроазиатского континента согласно формуле [8, 9]:

Таблица 1. Классификация грунтов и донных осадков водохранилищ Волги
Table. 1. Classification of ground and bottom sediments in the Volga reservoirs

Грунты			Основные физико-химические характеристики		
Группа	Подгруппа	Тип	Сумма фракций, %		Органическое вещество, %
			> 0,1 мм	< 0,01 мм	
Реликтовые (остаточные)	Минеральные	Скалы	–	–	< 1
		Валуны	–	–	< 1
		Галька	–	–	< 1
		Гравий	–	–	< 1
		Пески	> 90	< 10	< 1
		Глины	< 10	> 90	< 1
	Органические	Торф	–	–	> 70
Трансформированные	Минеральные	Обнаженные (размытые) почвы и породы	> 30	< 30	< 3
		Разбухшие почвы и породы	< 30	> 30	> 10
		Заболачивающиеся почвы	< 30	> 30	< 30
	Органические	Болотные почвы	< 30	> 30	> 30
Вторичные	Минеральные	Пески	100	–	< 1
		Илистые пески	> 70	< 30	1–5
		Песчанистые илы	< 70	> 30	5–10
		Глинистые илы	< 30	> 70	10–30
		Отложения из раковин		–	< 1
	Органические	Торфогенный ил	< 30	> 30	30–40
		Торфянистый ил	–	> 30	40–70
		Отложения из макрофитов	–	–	> 30

$$V_{м/с} = 2{,}16d^{1{,}07}(R^2 = 0{,}92,\ n = 222),$$

где V – придонная скорость течения (м/с);

d – средний диаметр частиц пробы (мм).

Придонная скорость течения включает в себя большое разнообразие гидродинамических процессов – стоковых и ветровых течений, воздействие волн на ложе и берега, способствующих седиментации и трансседиментации (переотложению) наносов и формированию типов осадков.

С учетом современных требований составлены карты грунтового комплекса водохранилищ Волги, где наглядно показана количественная и качественная трансформация различных типов донных осадков во времени и пространстве (список литературных источников приводится в [10]).

За многолетний период эксплуатации (от 45 лет Чебоксарского до 90 лет Иваньковского) водохранилищ Волги грунтовый комплекс достиг относительной стабильности, что очень важно для нормального функционирования пресноводных экосистем (рис. 2) [11].

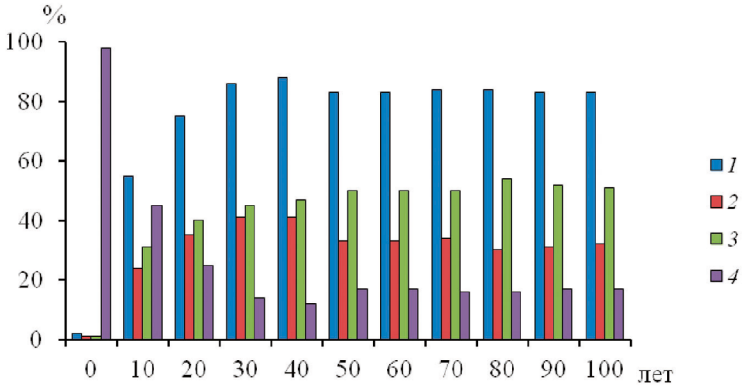


Рис. 2. Распределение площадей грунтового комплекса водохранилищ Волги и их прогноз к 100-летию эксплуатации: *1* – вторичные осадки, *2* – крупнозернистые наносы, *3* – тонкодисперсные отложения, *4* – трансформированные грунты

Fig. 2. Distribution of the areas ground complex of the Volga reservoirs and their forecast for the 100th anniversary of operation: *1* – secondary sediments, *2* – coarse-grained sediments, *3* – fine-grained sediments, *4* – transformed soils

Материалы зондирования толщи осадков (in situ) использовались для определения темпов седиментации. Расчеты показали, что максимум отложений (по абсолютной величине) отмечается в литорали (45–60 %), т. к. основное поступление осадкообразующего материала происходит за счет эрозионно-абразионных процессов (от 47 % в Чебоксарском до 86 % в Рыбинском).

Количественная оценка интенсивности осадконакопления, объем и вес вторичных осадков, а также прогноз к 100-летию водохранилищ представлены в табл. 3 [12].

Таблица 3. Динамика седиментационных характеристик и прогноз к 100-летию водохранилищ

Table. 3. Dynamics of sedimentation characteristics and forecast for the 100th anniversary of reservoirs

Водохранилище	Интенсивность осадконакопления, год$^{-1}$			Прогноз к 100-летию водохранилищ	
	A, мм	***B***, мм	***S***, млн м^3	***C***, мм/год	***V***, %
Иваньковское	3,0	1,9	0,5	1,6	2,3
Угличское	3,8	2,1	0,4	1,8	1,6
Рыбинское	9,2	2,7	10,3	2,0	2,1
Горьковское	9,6	2,3	3,5	2,2	2,0
Чебоксарское	3,0	1,8	1,8	3,0	1,8
Куйбышевское	8,0	4,4	223,0	3,8	9,6
Саратовское	5,0	3,8	52,0	2,8	9,7
Волгоградское	10,0	4,9	141,4	4,0	11,3
R^2	0,18	0,68	0,43	0,81	0,73

Примечание. *A*, мм – среднегодовое осадконакопление на площадь «вторичных» наносов по результатам первой грунтовой съемки; *B*, мм, *S*, млн м^3 – последней; *C*, мм/год – занесение на площадь водохранилища при НПУ; *V*, % – потеря объемов воды.

В период заполнения водохранилищ коэффициенты детерминации незначимы (R^2 = 0,18), а в последующие съемки происходит постепенное приспособление (R^2 = 0,43–0,81) нижнего яруса экосистем к новым условиям и географической зональности осадконакопления в каскаде (табл. 3).

Потери объемов воды за счет накопления донных отложений примерно одинаковые, что доказано независимыми исследованиями на Угличском, Горьковском и Волгоградском водохранилищах [12, 13].

Формирование ложа и берегов сопровождается изменениями основных проектных гидроморфометрических характеристик водохранилищ, прежде всего отражающихся на величинах площадей акватории и их объемах, что необходимо знать и использовать при современной эксплуатации искусственных водоемов (табл. 4).

Таблица 4. Основные проектные гидроморфометрические характеристики водохранилищ Волги и их трансформация

Table. 4. The main design hydro-morphometric characteristics of the Volga reservoirs and their transformation

Водохранилище	Год заполнения	Площадь, км^2	Объем, км^3	Период эксплуатации, лет	Площадь, км^2	Объем, км^3
Иваньковское	1937	327	1,12	85	287	1,10
Угличское	1940	249	1,24	82	226	1,22
Рыбинское	1941	4550	25,42	81	4480	25,00
Горьковское	1955	1591	8,70	67	1509	8,59
Чебоксарское*	1981*	2270	13,85	41*	1200	5,20
Куйбышевское**	1955	6450	58,00	61	5885	56,40
Саратовское	1967	1950	13,40	50	1833	11,97
Волгоградское	1958	3126	31,40	64	3248	28,08

Примечание. Чебоксарское* – уровень 68 м БС, уровень 63,5 м БС; Куйбышевское** – до и после создания Нижнекамской (1978 г.) и Нижнечебоксарской (1981 г.) ГЭС.

Интенсивность осадконакопления подчинена широтной географической зональности, которая увеличивается от зоны южной тайги до полупустынь в пределах Волжского водосборного бассейна и сопредельных территорий (рис. 3, рис. 4), подвергшихся техногенному воздействию в результате хозяйственной деятельности [14, 15].

Прежде всего эта зональность проявляется в изменении интенсивности осадконакопления – суммарного процесса осаждения крупнозернистых наносов и тонкодисперсных отложений – и менее четко по другим видам осадкообразования – занесению и заилению, которые в большей степени зависят от азональных факторов, связанных с особенностями режима эксплуатации ГЭС, гидроморфометрических показателей и антропогенного воздействия.

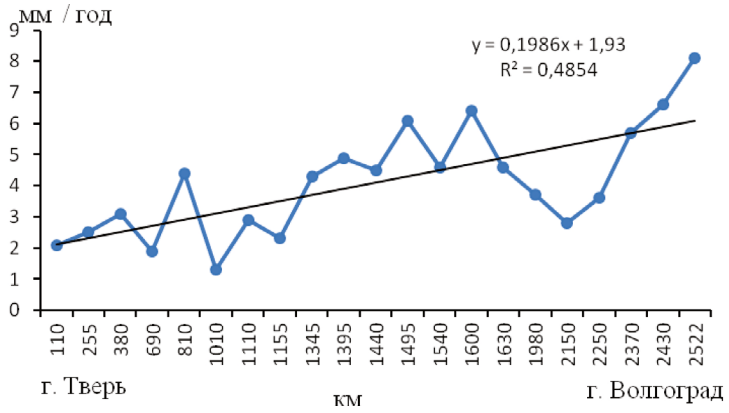


Рис. 3. Интенсивность осадконакопления в каскаде Волжских водохранилищ по участкам
Fig. 3. Sedimentation intensity in the cascade of the Volga reservoirs by section

Более четко географическая зональность осадконакопления проявляется в обследованных внутренних водах: в древних озерах Северо-Запада России – шесть (0,2–1,5 мм/год) и в современных озеровидных расширениях водохранилищ – 21 (1,5–7,0 мм/год), по одному расширению в Рыбинском, Иваньковском, Угличском, Саратовском, по три в Горьковском, Чебоксарском, Волгоградском и восемь в Куйбышевском, которые в пределах Палеоволги уже были озерами, а при строительстве плотин сохранили свои озерные очертания (табл. 5, рис. 4) [15].

Таблица 5. Основные гидроморфометрические характеристики отдельных озер Европейской территории России
Table. 5. The main hydromorphometric characteristics of individual lakes in the European part of Russia

Озера	*F*, км²	*V*, км³	Кв, год $^{-1}$	*Q*, мм / год
Лача	345	0,5	7,4	0,4
Воже	418	0,6	3,5	0,2
Белое	1284	5,3	0,9	0,5
Кубенское	417	1,0	3,6	1,3
Неро	58	0,9	2,2	1,5
Плещеево	52	5,8	3,0	1,0

Примечание: F, км² – площадь акватории; *V*, км³ – объем; Кв, год$^{-1}$ – коэффициент водообмена; *Q*, мм / год – скорость осадконакопления.

Рассматриваемая сеть лимнических систем находится между 36-м и 50-м меридианами на расстоянии с севера на юг примерно 1500 км от г. Каргополя до г. Волжский, значительная часть которых принадлежит бассейнам рек Онеги, Сухоны и Волги, включая гумидную и аридную зоны. Обследованные объекты отличаются резким нарушением равновесия в природе, где, наряду с естественными циклами водности, добавился режим эксплуатации озер

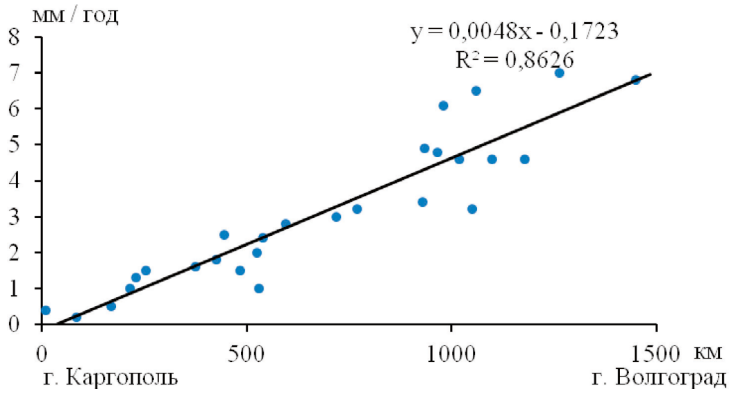


Рис. 4. Географическая зональность осадконакопления в озерах и озеровидных расширениях водохранилищ Волги

Fig. 4. Geographical zoning of sedimentation in lakes and lake-like extensions of the Volga reservoirs

и водохранилищ в интересах лесосплава, энергетики, судоходства, водоснабжения, рыболовства и рекреации.

Рассчитаны ориентировочные (по разности между известными статьями) и замкнутые (где все составляющие определены) седиментационные балансы и их динамика (табл. 6).

Таблица 6. Средние балансы взвешенных наносов водохранилищ Волги за период 1937–2025 гг., %

Table. 6. Average suspended sediment balances of the Volga reservoirs for the period 1937–2025, %

Основные составляющие	Приход	Основные составляющие	Расход
Абразия, эрозия	71 (47–86)	Осадконакопление	78 (62–96)
Сток речных наносов	26 (10–46)	Сток наносов через гидроузел	22 (4–48)
Продукция гидробионтов	3 (1–6)		
Всего	100	Всего	100

Все статьи приведенных балансов водохранилищ недостаточно точны, поэтому разброс от средних значений довольно значительный, что указывает на их индивидуальные особенности. На примере отдельных замкнутых балансов взвешенных наносов (Угличское, Горьковское, Куйбышевское, Волгоградское водохранилища) оценка точности расчета отдельных статей показала, что имеющиеся невязки от 3,2 % в Горьковском до 10,8 % в Куйбышевском не превосходят возможные ошибки их определения. Это обстоятельство позволяет считать, что они достаточно верно отражают ход абиотических и биотических процессов в рассматриваемых водоемах.

Осадкообразование – это завершающий процесс седиментации автохтонных и аллохтонных, абиотических и биотических, минерально-органо-химических компонентов, природных и антропогенных взвешенных веществ и на-

носов, способствующих естественному самоочищению воды. Таким образом, процесс седиментации – это первичная физическая стадия улучшения качества природных вод, далее следует физико-химическая, химическая и наиболее обширная по значимости – биологическая, которые взаимосвязаны и накладываются друг на друга и хорошо описаны в научной литературе [16–18].

Важнейшим гидроэкологическим фактором процесса осадкообразования является распределение и накопление илисто-глинистых отложений, т. к. только они депонируют весь комплекс природных органических и антропогенных загрязняющих веществ из различных источников и характеризуют продуктивность дна водных экосистем.

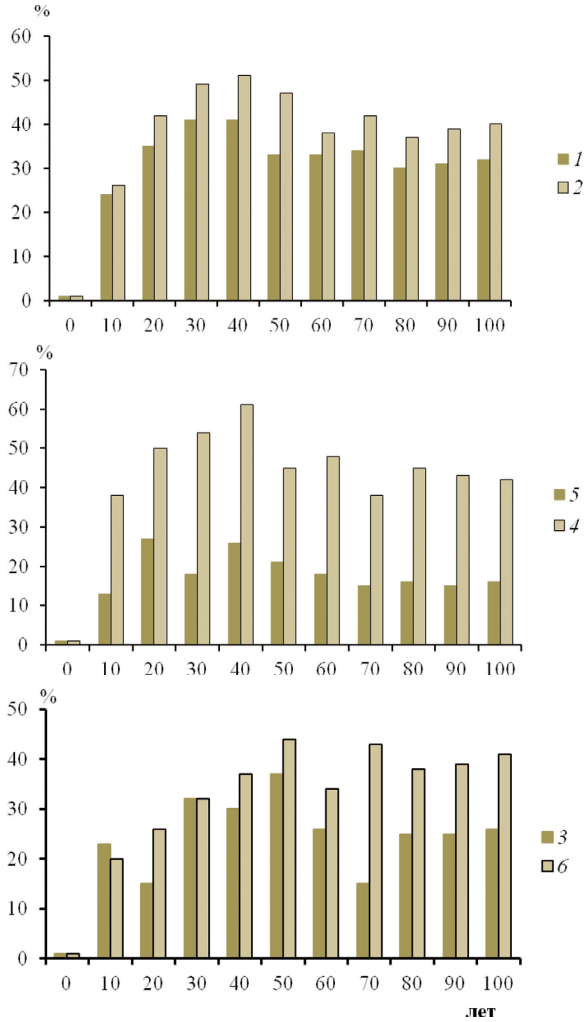


Рис. 5. Динамика и прогноз площадей илистых отложений в системе водохранилищ Волги: *1* – в целом по водохранилищам, *2* – озерные районы, *3* – мелководные заливы, *4* – приплотинные участки, *5* – речные районы, 6 – глубоководные заливы

Fig. 5. Dynamics and forecast of silt sediments areas in the Volga reservoir system: *1* – in general for reservoirs, *2* – lake areas, *3* – shallow bays, *4* – dam areas, *5* – river areas, *6* – deep-water bays

Места накопления илов – участки водоемов, где наблюдается слабая динамика гидрологических процессов. Она способствует безвозвратному захоронению взвешенных органоминеральных и растворенных веществ различного происхождения (природных и антропогенных) гравитационно-сорбционным путем, а в экстремальных гидрометеорологических условиях – взмучиванию и вторичному загрязнению воды. Кроме того, илистые отложения являются средой обитания и пищевым объектом значительной группы гидробионтов – бактерий, грибов, бентоса и бентосоядных рыб. Динамика и прогноз площадей всех типов грунтов, в том числе илистых отложений, в системе водохранилищ Волги представлены на рис. 2, рис. 5.

Наибольшие различия отмечаются в речных районах (нижних бьефах) и открытых глубоководных заливах, где динамика изменения площадей илов зависит от морфометрических характеристик и величин твердого стока, поступающего с основной рекой Волгой через плотины и крупные реки с дельтами. Коэффициенты корреляции для них равны: $R^2_5 = 0{,}16$, $R^2_6 = 0{,}79$ при $n_5 = 90$, $n_6 = 40$ соответственно.

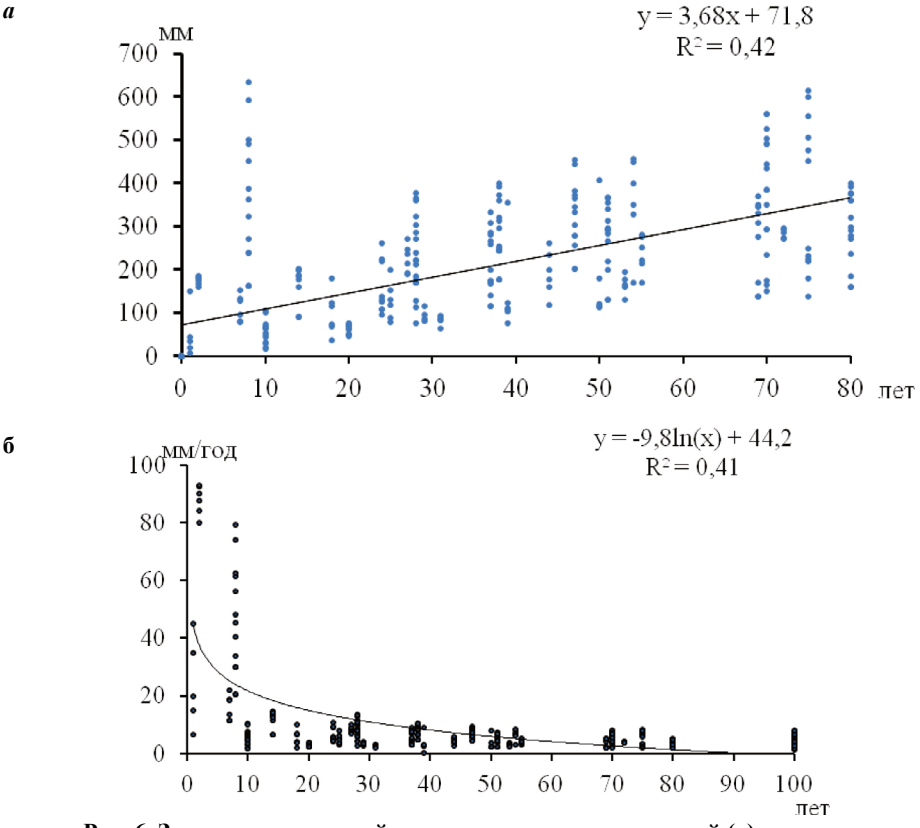


Рис. 6. Зависимость средней толщины илистых отложений (*а*) и интенсивность илонакопления (*б*) от продолжительности существования водохранилищ ($n = 360$)

Fig. 6. Dependence of the average thickness of silt sediments (*a*) and the intensity of silt accumulation (*b*) on the duration of reservoirs ($n = 360$)

Трансформация площадей донных осадков в целом по каскаду, отдельным районам и участкам происходит в период активизации эрозионно-абразионных процессов, повышенных темпов седиментации, затем наступает стабилизация, когда площади песчанистых и глинистых илов не меняются или происходит их слабая флуктуация в результате воздействия многолетних и сезонных природных и антропогенных факторов.

Зависимость увеличения площадей распределения илов в пространственно-временном аспекте не выражена, что вполне естественно, так как их ареалы формируются уже в первые годы существования водохранилищ и менее подвержены изменениям.

Мониторинговые материалы по осадконакоплению в водохранилищах Волжского каскада, включающие прямые определения толщины кернов (мм) и скоростей илонакопления (мм/год) позволили выявить значимые корреляционные связи во времени – $R^2 = 0{,}42$, 041 соответственно (рис. 6).

Согласно балансам взвешенных наносов (табл. 6), на дне водоемов накапливается от 62 до 96 % осадков. Из них примерно 10–50 % тонкодисперсных взвесей, поступающих с речным стоком и продукцией гидробионтов, формируя органоминеральный состав илов с концентрациями органического вещества от 5 % в песчанистых илах до 40 % в торфогенных. Сброс взвесей через гидросооружения находится в пределах от 4–5 % в Рыбинском и Куйбышевском до 50 % в Чебоксарском и Саратовском с высоким водообменом (Кв = 18–20). Все это подтверждает седименто-накопительную (депонирующую) функцию водоемов замедленного водообмена (Кв = 1,9–9,0) относительную стабильность формирования ложа и его структуры.

Максимальная мощность илистых отложений, зарегистрированных в Иваньковском водохранилище, составляет 120 см, Угличском – 85, Рыбинском – 300, Горьковском – 96, Чебоксарском – 110, Куйбышевском – 120, Саратовском – 65, Волгоградском – 85 см.

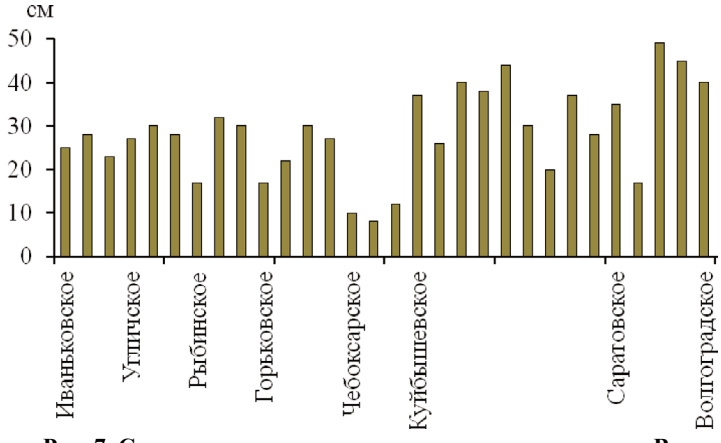


Рис. 7. Средняя толщина илов в системе водохранилищ Волги
Fig. 7. Average thickness of silt in the Volga reservoir system

По результатам грунтовых съемок, толщина слоя илов постепенно увеличивается от водохранилищ Верхней Волги к Нижней (рис. 7). В первую очередь это связано с увеличением мелкодисперсности частиц в береговых откосах, сложенных глинистой брекчией (бурый ил), известковисто-доломитовыми, глинисто-мергелистыми породами (белый ил), а также Хвалынской глиной и лесовидными суглинками, которые становятся преобладающими в зоне перехода от степной к полупустынной местности.

Сводка показателей илонакопления подтверждает, что средняя годовая потеря полного объема водохранилища за счет отложения илов невелика и не представляет каких-либо препятствий для эксплуатации равнинных водохранилищ в течение нескольких сотен лет. Однако с точки зрения влияния на гидрологические и гидрохимические процессы более важным показателем является интенсивность илонакопления и ее изменения в пространстве и во времени, описываемые уравнением гиперболического типа (рис. 6 *б*).

Характер пространственно-временного распределения и накопления тонкодисперсных отложений свидетельствует о том, что интенсивная стадия формирования ложа сменилась на пассивную.

Водохранилища и озера в их системе находятся под влиянием изменяющихся природных и техногенных факторов, поэтому мониторинг их состояния является неотъемлемой частью исследования по широкому спектру естественных наук.

ВЫВОДЫ

Закономерности осадкообразования в крупных равнинных водохранилищах и трансформация балансовых характеристик, выявленные на основании многоразовых грунтовых съемок, позволили установить общую направленность процессов формирования ложа и спрогнозировать их количественные характеристики.

В результате функционирования водных экосистем произошли значительные изменения в их грунтовом комплексе. На ранних стадиях они носили стохастический характер, зависивший от нестационарности природных явлений, нарушенных техногенным воздействием. По мере увеличения сроков эксплуатации искусственных водоемов изменения в структуре дна приобрели определенные тенденции. Так, постепенно утратили природный качественный состав размытые и разбухшие почвы в аквальных условиях по сравнению с их аналогами на суше. По мере развития высшей водной растительности появились острова-сплавины из отмерших макрофитов. Срастаясь с дном, они создают болотные ландшафты, отчуждая часть акватории. Продукты этих процессов в совокупности с продукцией фито- и зоопланктона обогащают все типы минеральных осадков органическим веществом, необходимым для жизнедеятельности гидробионтов. Таким образом, осуществляется малый геологиче-

ский круговорот в природе, поддерживающий функционирование как водных, так и наземных экосистем.

В толще осадков начинаются ранние стадии диагенеза, связанные с уплотнением и депонированием биогенных и загрязняющих веществ, поступивших из различных источников, который проявляется в виде суммарного геохимического эффекта в сочетании с продукционной жизнедеятельностью организмов. По В. И. Вернадскому, изучение физико-химических условий в пространственных системах (как на суше, так и в воде) с учетом геохимического – биотического фактора (живого вещества) приобретает особое значение [19]. Это направление должно стать ведущим в системе исследований в сопредельных средах: атмосфере – гидросфере – литосфере – биосфере.

Пути изменения грунтового комплекса водохранилищ характеризуются не только количественными параметрами – структурой площадей различных типов донных осадков, интенсивностью осадкообразования, но и качественными – органическим веществом, биогенными элементами и другими поллютантами.

Искусственные водоемы, в отличие от древних озерных систем, находятся в большей степени под влиянием неустоявшихся естественных и антропогенных факторов, а озера, вовлеченные в техногенные эксперименты, испытывают те же преобразования, что и озеровидные расширения водохранилищ, поэтому период их окончательной стабилизации наступит не скоро.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н. И. Экологическая гидрология и гидроэкология в системе наук // Гидроэкология: теория и практика. Вып. 2. М.: МГУ, 2004. С. 6–37.
2. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
3. Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
4. Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов (С. А. Поддубный, В. В. Законнов, А. В. Кутузов и др.) / отв. ред. С. А. Поддубный, Ярославль: Филигрань, 2024. 206 с. https://doi.org/10.47021/monography_653f94c6bc8.69020116
5. Законнов В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дис. … докт. геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 42 с.
6. Новиков Б. И. Донные отложения Днепровских водохранилищ. Киев: Наук. Думка, 1985. 172 с.
7. Шагидуллин Р. Р. Эколого-аналитический контроль равнинного водохранилища. Казань: Казан. ун-т, 2011. 336 с.
8. Законнов В. В. Течения и их роль в формировании наносов. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 1. Гидро-геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. С. 65–68.

9. 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 // Труды ИБВВ РАН, 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
10. Законнов В. В., Филиппов О. В., Баранова М. С., Кочеткова А. И., Законнова А. В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 8. Формирование берегов и ложа Волгоградского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 6–28. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-1
11. Законнов В. В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды ИБВВ РАН, 2016. Вып. 75 (78). С. 30–40.
12. Законнов В. В., Законнова А. В. Изменение природной среды под воздействием водохранилищ. Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов: сб. трудов, посв. 100-летию со дня рожд. Ю. М. Матарзина. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2024. С. 52–56.
13. Землянов И. В., Шикунова С. Ю., Горелиц О. В., Павловский А. С. Использование цифровой модели рельефа для уточнения современных морфометрических характеристик водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов // Труды межд. науч.-практ. конф. Пермь, 2011. С. 189–193.
14. Законнов В. В., Законнова А. В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 2. С. 105–111.
15. Законнов В. В., Законнова А. В. Природно-техногенная трансформация озер и водохранилищ // Матер. III Межд. конф. «Озера Евразии». Казань, 2025. С. 391–395.
16. Остроумов С. А. О самоочищении водных экосистем // Антропогенное влияние на водные экосистемы. М.: МГУ, 2005. С. 94–119.
17. Titman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability // Ecology. 1996. Vol. 77. P. 350–363.
18. Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.
19. Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1987. 340 с.

REFERENCES

1. Alekseevsky N. I. Ecological hydrology and hydroecology in the system of sciences. *Hydroecology: Theory and Practice*. *Issue 2.* M.: Moscow State University, 2004. Vol. 2. P. 6–13.
2. Kuznetsov S. I. Lake microflora and its geochemical activity. Leningrad: Science, 1970. 440 p.
3. Butorin N. V., Ziminova N. A., Kurdin V. P. Bottom sediments in the Upper Volga reservoirs. Leningrad: Nauka, 1975.160 p.
4. Geographical methods of studying ecosystems of inland reservoirs / ed. by S. A. Poddubny. Yaroslavl': Filigran' 2024. 206 p. https://doi.org/10.47021/monography_653f94c6bc8.69020116
5. Zakonnov V. V. Sedimentation in the reservoirs of the Volga cascade: abstract of the doctoral geographic thesis. Moskva. 39 p.
6. Novikov B. I. Bottom Sediments in the Dnieper reservoirs. Kiev: Naukova dumka, 1985. 169 p.
7. Shagidullin R. R. Environmental and analytical control of a flat reservoir. Kazan: Kazan University, 2011. 336 p.
8. Zakonnov V. V. Currents and their Role Information of Sediments. Modern Problems of Reservoirs and their Catchments. Vol. 1. Hydro-geodynamic processes. Water resources management. Perm: Perm State National University research, 2017. P. 65–68.
9. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Sherysheva N. G. Hydro-dynamic processes and their role in formation of the Volga-Kama reservoir cascade bottom sediments. *Proceedings of IBIW RAS*, 2018. Iss. 81 (84). P. 34–46.

10. Zakonnov V. V., Filippov O. V., Baranova M. S., Kochetkova A. I., Zakonnova A. V. Spatial and temporal transformation of the ground complex of the Volga reservoirs. Message 8. Formation of the banks and bottom of the Volgograd reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 6. P. 6–28. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-1
11. Zakonnov V. V. Silt accumulation in the Volga cascade Reservoir system. *Proceedings of IBIW RAS*, 2016. Iss. 75 (78). P. 30–40.
12. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Changes in the natural environment caused by reservoirs. Comprehensive studies of reservoirs and their catchments. Collection of works dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. M. Matarzin. Perm: Perm State National University, 2024. P. 52–56.
13. Zemlyanov I. V., Shikunova S. Yu., Gorelets O. V., Pavlovsky A. S. Using a digital elevation model to refine the current morphometric characteristics of reservoirs. *Modern problems of reservoirs and their catchments.* 2011. P. 189–193.
14. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Geographical zonality of sediment formation in the system of the Volga reservoirs. *Proceedings of RAS. Series of Geography.* 2008. No. 2. P. 105–111.
15. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Natural and technogenic transformation of lakes and reservoirs. *Materials of III International conference «Lakes of Eurasia»*. Kazan, 2025. P. 391–395.
16. Ostroumov S. A. On the self-purification of aquatic ecosystems. *Anthropogenic Impact on aquatic Ecosystems*. M.: Moscow State University, 2005. P. 94–119.
17. Titman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology.* 1996. Vol. 77. P. 350–363.
18. Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.
19. Vernadsky V. I. Chemical structure of the Earth's biosphere and its environs. M.: Science, 1987. 340 p.

Сведения об авторе:

Законнов Виктор Васильевич, д-р геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина», Российская академия наук, Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 59, кв. 42; https://orcid.org/0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

About the author:

Viktor V. Zakonnov, Dr. of Geography, Chief Researcher, Russian Academy of Sciences, I. D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Borok, 59-42, Nekouzskiy r-n, Yaroslav oblast, 152742, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

Поступила в редакцию / Received 25.06.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 22.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.