

УДК 556.114.7:556.55

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ И АККУМУЛЯЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР – ОТЧЛЕНЕННЫХ ЗАЛИВОВ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И. И. Зиганшин*, Д. В. Иванов, Р. Р. Хасанов, В. С. Валиев,
А. Б. Александрова

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан
(ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087), *Irek.Ziganshin@tatar.ru*

В контексте глобальных климатических изменений, вызванных ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, особую актуальность приобретают исследования процессов депонирования углерода в природных средах. Значительную роль в глобальном углеродном цикле играют донные отложения водоемов, выступающие в качестве долговременных хранилищ органического вещества. В статье приводятся результаты исследования процессов осадконакопления и аккумуляции углерода в донных отложениях 12 озер, образованных при отчленении заливов Куйбышевского водохранилища в пределах Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны (Средняя Волга, Республика Татарстан). Установлены пространственные закономерности распределения мощности донных отложений, накопленных в озерах-заливах за период с момента образования водохранилища, которая варьирует от 5 до 48 см. Показано, что скорость осадконакопления в исследуемых водоемах зависит от батиметрических особенностей их ложа и возрастает от 0,8–3,0 мм/год на участках с глубиной < 1 м до 3,9–7,2 мм/год на отметках глубин > 2 м, что в пересчете на количество вещества, ежегодно аккумулируемого на единицу площади дна, составляет 680–3186 г/м². Содержание органического вещества в донных отложениях, представленных преимущественно песчанистыми илами и илистыми песками, относительно невысоко и изменяется от 0,2 до 12,1 %. Отмечена зависимость между глубиной водоема и скоростью аккумуляции органического углерода в озерных осадках, которая в среднем составляет 29, 53 и 66 г С/м² · год для глубин < 1 м, 1–2 м, > 2 м соответственно. Максимальные скорости накопления углерода характерны для ряда мелководных, изолированных от водохранилища озер с интенсивным развитием макрофитов – до 89 г С/м² · год. Запасы углерода в донных отложениях, приходящиеся на единицу площади дна, имеют тенденцию к росту с увеличением глубины: 22 т С/га – < 1 м, 28 т С/га – от 1 до 2 м, 44 т С/га – > 2 м, что соответствует 79–161 т/га в СО₂-эквиваленте. Основная часть терригенного и аутигенного углерода, осаждающегося в донных отложениях в течение годового цикла седиментации, с потоками газов (углекислый газ, метан) со дна озер возвращается в природные биогеохимические циклы.

Ключевые слова: осадконакопление; органический углерод; депонирование; озера – отчлененные заливы; Куйбышевское водохранилище

Для цитирования: Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Валиев В. С., Александрова А. Б. Осадконакопление и аккумуляция органического углерода в донных отложениях озер – отчлененных заливов Куйбышевского водохранилища // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 70–81. doi: 10.17076/lim2207

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан (Соглашение от 16.12.2024 № 98/2024 – ПД), предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

I. I. Ziganshin*, D. V. Ivanov, R. R. Khasanov, V. S. Valiev, A. B. Alexandrova. SEDIMENTATION AND ORGANIC CARBON ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF LAKES FORMED IN DETACHED BAYS OF THE KUIBYSHEV STORAGE RESERVOIR

*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *Irek.Ziganshin@tatar.ru*

In the context of global climate change driven by growing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, the study of carbon deposition processes in natural environments is particularly relevant. The bottom sediments of water bodies, which act as long-term reservoirs of organic matter, play a significant role in the global carbon cycle. This article presents the results of a study on sedimentation and carbon accumulation processes in the sediments of 12 lakes. These lakes were formed by the separation of bays from the Kuibyshev Reservoir, located within the Saralinsky section of the Volga-Kama State Nature Biosphere Reserve and its buffer zone (Middle Volga, Republic of Tatarstan). The study identified the spatial distribution patterns of the sediments that have accumulated in these lakes since impoundment, as well as their thickness, which ranges from 5 to 48 cm. The sedimentation rate in the studied reservoirs was found to depend on their bed bathymetry, increasing from 0.8–3.0 mm/yr in areas shallower than 1 m to 3.9–7.2 mm/yr at depths exceeding 2 m. This corresponds to an annual mass accumulation rate of 680–3186 g/m². The organic matter content in the sediments, which are predominantly composed of sandy silt and silty sand, is relatively low, ranging from 0.2 to 12.1 %. A clear relationship was observed between water depth and the organic carbon accumulation rate, which averaged 29, 53, and 66 g C m⁻² yr⁻¹ for depths of <1 m, 1–2 m, and >2 m, respectively. The highest carbon accumulation rates are typical for the deep-water zones of most lakes, as well as for some shallow detached lakes that have intensive macrophyte growth, reaching up to 89 g C m⁻² yr⁻¹. Carbon stocks in the sediments per unit area of the lake bed also increase with depth: from 22 t C ha⁻¹ in the shallow zone and 28 t C ha⁻¹ at depths of 1 to 2 meters to 44 t C ha⁻¹ in the deep-water zone. This corresponds to 79–161 t ha⁻¹ in CO₂ equivalent. Most of the terrigenous and authigenic carbon deposited in the sediments during the annual cycle returns to the biogeochemical cycle via ascending flows of gases (carbon dioxide and methane) from the lake bottom.

Keywords: sedimentation; organic carbon; carbon deposition; lakes in detached bays; Kuibyshev storage reservoir

For citation: Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Valiev V. S., Alexandrova A. B. Sedimentation and organic carbon accumulation in sediments of lakes formed in detached bays of the Kuibyshev storage reservoir. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 70–81. doi: 10.17076/lim2207

Funding. The work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, awarded to young Cand. Sci. degree holders (postdoctoral researchers) for preparing Dr. Sci. dissertation, conducting scientific research, and fulfilling duties at scientific and educational institutions of the Republic of Tatarstan under the State Program of the Republic of Tatarstan «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan» (Agreement No. 98/2024–PD).

Введение

Климатические изменения представляют собой один из наиболее масштабных и сложных вызовов современности. Важнейшей причиной наблюдаемых изменений являются выбросы парниковых газов, прежде всего углекислого газа (CO_2), концентрация которого в атмосфере в два раза превышает доиндустриальный уровень [Friedlingstein et al., 2014]. Рост концентрации CO_2 приводит к увеличению средней температуры на планете, сопровождающемуся усиленным таянием ледников и многолетней мерзлоты, повышением уровня Мирового океана и учащением экстремальных погодных явлений. В этих условиях исследования процессов накопления углерода, определяющих баланс между его поглощением природными средами и возвратом в атмосферу в виде парниковых газов, приобретают особую актуальность.

Значительную роль в снижении уровня углерода в атмосфере играют процессы его извлечения из атмосферного воздуха и последующего депонирования в компонентах природной среды, таких как почвенный покров, растительность, торф. Важную роль в глобальном углеродном цикле играют донные отложения водоемов, выполняющие функцию долговременного хранилища органического вещества [Мартынова, 2006; Cole et al., 2007; Tranvik et al., 2009; Sobek et al., 2009; Mendonça et al., 2017; Casas-Ruiz et al., 2023]. При этом потенциал донных отложений озер европейской части России остается недостаточно изученным [Белкина, 2011, 2017, 2019; Иванов и др., 2021; Сигарева и др., 2022; Потахин и др., 2025].

Строительство волжских водохранилищ привело к масштабным изменениям природных ландшафтов. В результате подъема их уровня до проектной отметки под водой оказались значительные площади речных пойм и надпойменных террас, в том числе различные отрицательные формы рельефа – овраги, балки, ложбины, а также озера и болота. Одним из последствий этого процесса стало формирование на водохранилищах сложной береговой линии с большим количеством заливов, многие из которых со временем подверглись естественной или искусственной изоляции от основной акватории вследствие накопления наносов, постепенного зарастания водной растительностью и изменений гидрологического режима. В результате возник совершенно новый тип озер – отчлененные заливы, сочетающие в себе черты как искусственных, так и естественных водных объектов.

На территории Республики Татарстан их образование в основном связано с абразионными-

аккумулятивными процессами, происходящими в прибрежной зоне Куйбышевского водохранилища. При отметках, приближенных к нормальному подпорному уровню 53 м Балтийской системы, в водохранилище насчитывается около 1400 водоемов соответствующего генезиса с суммарной площадью акватории 5632 га. Имеющиеся о них сведения ограничены морфометрическими характеристиками [Зиганшин и др., 2021a, 2024; Ziganshin et al., 2025]. Роль озер в аккумуляции и эмиссии органического углерода ранее не изучалась, исследования содержания и запасов органического углерода в донных отложениях водных объектов республики в целом весьма ограничены [Ziganshin et al., 2024].

Целью настоящей работы является изучение параметров осадконакопления и аккумуляции органического углерода в донных отложениях озер – отчлененных заливов, расположенных в границах Казанского района переменного подпора и Волжско-Камского плеса Куйбышевского водохранилища.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись 12 озер, расположенных на территории Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны, происхождение которых связано с затоплением водами Куйбышевского водохранилища в 1955–1957 гг. отрицательных форм рельефа II надпойменной террасы Волги (Байкуль, Волжское, Карташихинское, Круглое, Старое, Сайкуль, Чебаркуль) и Камы (Атабаевское, Ближнее, Большое, Дальнее, Лиса) с последующей изоляцией образовавшихся заливов от основной акватории абразионно-аккумулятивными пересыпями или искусственным путем (рис. 1). Озера Волжское, Ближнее, Большое, Лиса и Старое в период половодья имеют гидрологическую связь с водохранилищем. Озера Байкуль, Карташихинское, Круглое, Сайкуль, Чебаркуль, Атабаевское и Дальнее в настоящее время представляют собой полностью изолированные водные объекты.

Для установления морфометрических характеристик озер использовались спутниковые снимки Sentinel-2 сервиса Google Earth Pro и данные батиметрических измерений, выполненные в период летней межени 2024 г. Батиметрическая съемка озер проводилась при помощи эхолота «Garmin EchoMap UHD 92sv» с трансдюсером GT56 с ультравысокой детализацией с установленным программным обеспечением «Garmin QuickDraw Contours». Полученные дан-

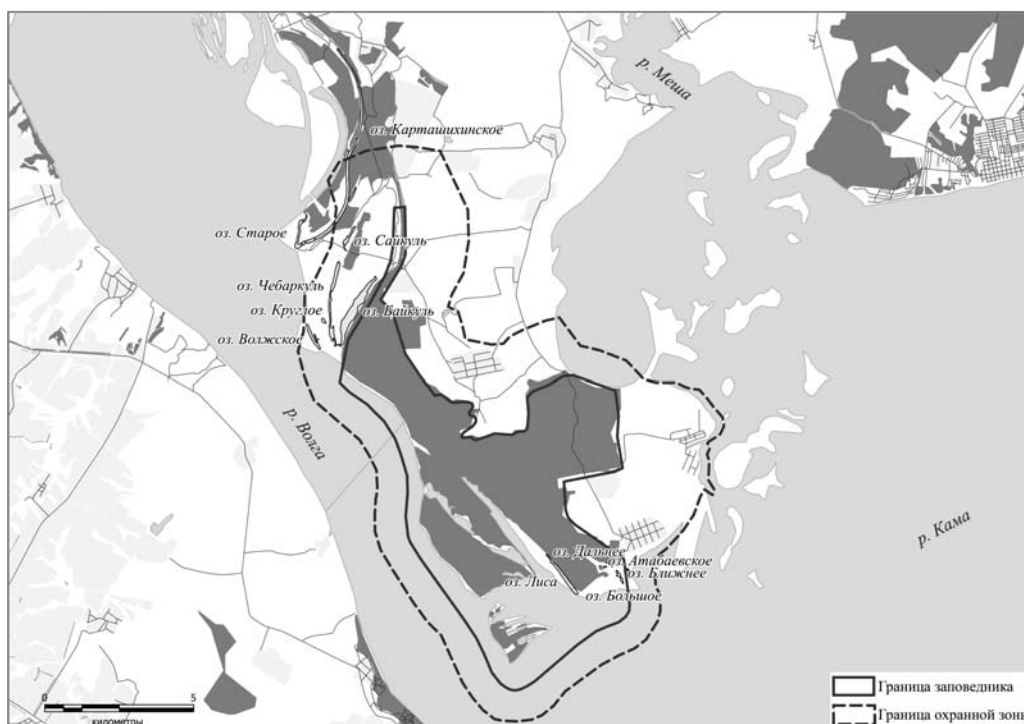


Рис. 1. Карта-схема расположения озер

Fig. 1. Location of the lakes

ные экспортировались в среду программного обеспечения ReefMaster 2.0 для создания карт подводного рельефа и анализа эхолокационных данных. Сгенерированные карты изобат с шагом 1 м были экспортированы в виде полигонов в формате shape для дальнейшего анализа морфометрических показателей в среде программного пакета Mapinfo Pro 16.

Грунтовая съемка выполнена с использованием трубки ГОИН «ТГ-1» и торфяного бура Гиллера «ТБГ-1». Исходя из особенностей рельефа дна, в каждом озере отобрано от 8 до 22 кернов донных отложений мощностью от 5 до 48 см. После морфологического описания керны разделяли на слои мощностью 5 см для физико-химического анализа.

Для оценки вклада терригенной составляющей в формирование вещественного состава отложений выполнен отбор смешанных образцов гумусовых горизонтов почв водосборной территории.

Аналитические исследования почв (21 образец) и донных отложений (93 образца) включали определение объемного веса (ГОСТ 5180–2015), гранулометрического состава (ГОСТ Р 12536–2014) и органического вещества (ОВ) (ГОСТ 26213–2021).

Для вычисления доли $C_{орг}$ в общей массе ОВ использовали коэффициент 0,58 [Аринушкина, 1970].

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета Statistica 8.0.

Результаты и обсуждение

По площади акватории озера Саралинского участка Волжско-Камского заповедника относятся к классу озерков и маленьких озер с максимальной глубиной от 1 до 2,7 м [Зиганшин и др., 20216]. Озера волжской группы по сравнению с камскими имеют большие размеры и глубины. При этом в группе камских озер глубины менее 1 м занимают от 60 до 100 % площади акватории (табл. 1). По этой причине для них характерна более высокая степень зарастания [Хасанов и др., 2025]. Волжские озера отличаются удлиненной формой котловины, наследуют черты затопленных при создании водохранилища оврагов и балок (рис. 2). Озера камской группы, кроме вытянутого оз. Лиса, по форме котловины более близки к овальной форме (рис. 3).

Изученные озера – молодые лимнические объекты, толщина накопленных в их ложе за 70-летний период донных отложений колеблется от 5 до 48 см, в среднем составляя 21 см. Отложения достигают максимальной мощности в понижениях исходного рельефа, расположенных, как правило, в центральных частях котловин, минимальная толщина слоя осадка приурочена к полосе прибрежных мелководий (рис. 2 и 3).

Таблица 1. Морфометрические характеристики озер

Table 1. Morphometric characteristics of the lakes

Озеро Lake	Площадь, га Area, ha	Объем, тыс. м³ Volume, thous. m³	Длина, м Length, m	Ширина, м Width, m		Глубина, м Depth, m		Доля мелководий <1 м, % Proportion of shallows <1 m, %
				сред. aver.	макс. max	сред. aver.	макс. max	
II надпойменная терраса р. Волги II terrace of the Volga River								
Байкуль Baikul	52,17	747,5	2707	193	306	1,4	2,7	23,6
Волжское Volzhskoye	8,72	105,2	993	88	101	1,2	2,3	38,0
Карташихинское Kartashikhinskoye	58,18	465,4	7476	78	172	0,8	2,7	55,1
Круглое Krugloye	1,50	12,2	218	70	106	0,8	1,3	50,1
Сайкуль Saykul	5,89	33,2	923	64	127	0,6	1,0	98,7
Старое Staroye	10,59	158,9	1561	68	161	1,5	2,9	25,0
Чебаркуль Chebarkul	22,85	257,6	2962	77	150	1,1	2,7	24,8
II надпойменная терраса р. Камы II terrace of the Kama River								
Атабаевское Atabaevskoe	1,04	9,3	275	38	72	0,9	1,4	64,3
Ближнее Blizhneye	0,48	3,4	151	28	58	0,8	1,2	99,4
Большое Bolshoye	2,94	32,4	506	58	141	1,1	1,7	78,6
Дальнее Dalneye	1,67	13,1	269	54	91	0,9	1,3	89,5
Лиса Lisa	14,88	34,1	1713	87	121	0,5	1,3	81,9

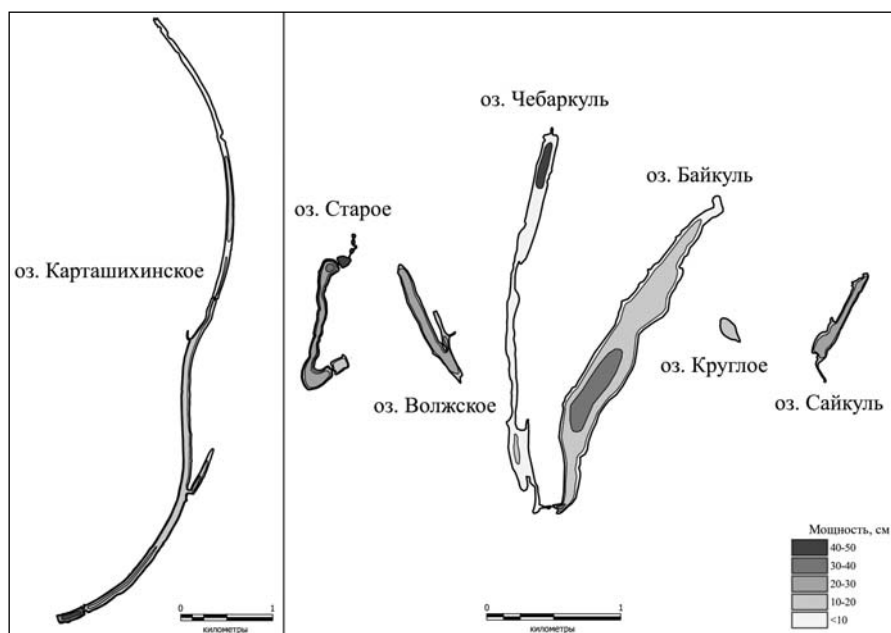


Рис. 2. Карта-схема мощности донных отложений озер, расположенных на II надпойменной террасе р. Волги

Fig. 2. Schematic map of the sediments thickness of the lakes located on the II terrace of the Volga River

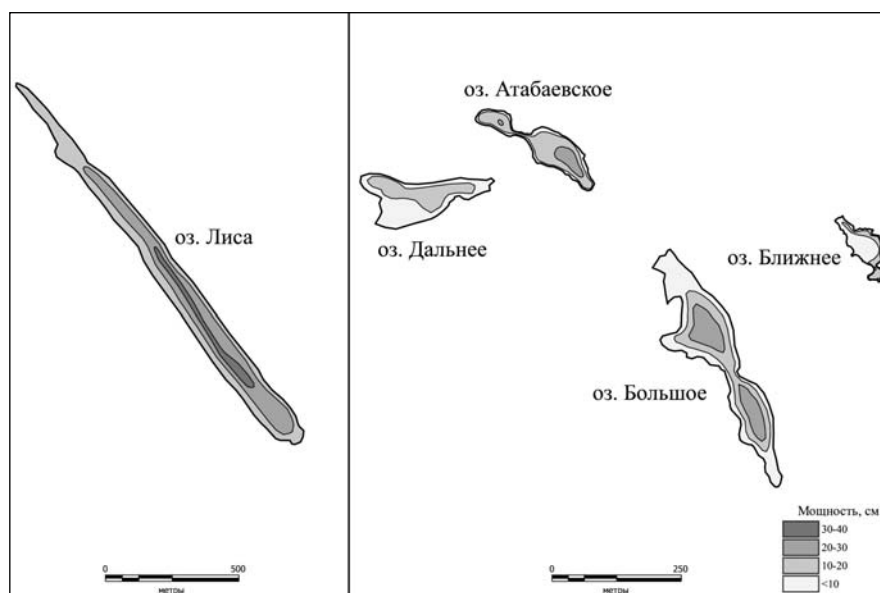


Рис. 3. Карта-схема мощности донных отложений озер, расположенных на II надпойменной террасе р. Камы

Fig. 3. Schematic map of the sediments thickness of the lakes located on the II terrace of the Kama River

Наиболее активно заиливаются озера, сохранившие периодическую (сезонную) гидрологическую связь с водохранилищем (Большое, Лиса, Старое), последнее служит одним из источников пополнения их котловин терригенным материалом.

Наличие в нижней части кернов маркерных слоев, представленных гумусовыми горизонтами почв, погребенных сначала водохранилищными, а затем собственно озерными отложениями, позволило рассчитать скорости и объемы накопления осадочного материала за период существования озер.

С учетом зависимости характера осадконакопления от глубины водоема в акватории озер было выделено три интервала (зоны) глубин: <1 м, 1–2 м и >2 м, в пределах которых выполнены расчеты интенсивности аккумуляции осадочного материала (табл. 2), включая органический углерод.

Высота слоя ежегодно аккумулируемых осадков в исследуемых водоемах лежит в диапазоне, характерном для озер и водохранилищ бассейна Средней Волги – 3–7 мм/год [Законнов и др., 2010; Иванов и др., 2011, 2018]. Она имеет тенденцию к увеличению с глубиной: 0,8–3,0 мм/год – на глубинах менее 1 м, 2,2–5,9 мм/год – в интервале глубин 1–2 м, 3,9–7,2 мм/год – более 2 м.

Скорости осадконакопления в озерах заповедника в зависимости от характерных для

них глубин варьируют в достаточно широких пределах – от 680 до 3186 г/м² в год (табл. 2). Средняя скорость накопления осадочного материала в озерах равна 1748 г/м² в год при медианном значении 1500 г/м² в год.

В озерах формируются различные типы минеральных осадков с содержанием ОВ от 0,2 до 12,1 %. Преобладание в структуре отложений песчаных илов обусловлено преимущественным поступлением и накоплением в ложе озер терригенных продуктов размыва четвертичных древнеаллювиальных отложений и почв водосборов, сложенных в основном песками, супесями и легкими суглинками (табл. 3). Вклад терригенного ОВ в формирование пула органического углерода донных отложений, по видимому, не менее существенен, поскольку средние величины его накопления в обеих средах практически одинаковы – около 4 %.

Анализ данных, характеризующих показатели накопления органического углерода в донных отложениях озер, показал возрастание скорости аккумуляции $C_{орг}$ по мере увеличения глубины водоема (табл. 4), что обусловлено постепенным понижением интенсивности процессов минерализации поступающего на дно ОВ в условиях преобладания анаэробных процессов над аэробными, низкого окислительно-восстановительного потенциала донных отложений, слабого перемешивания столба воды в сравнении с мелководной зоной.

Таблица 2. Скорость осадконакопления (R) в озерах
Table 2. Sediment accumulation rate (R) in the lakes

Озеро Lakes / Глубина Depth	<1 м <1 m				1–2 м 1–2 m				>2 м >2 m			
	S*, га S, ha	H, м H, m	R		S, га S, ha	H, м H, m	R		S, га S, ha	H, м H, m	R	
			мм/ год mm/ year	г/(м² · год) g/(m² · year)			мм/ год mm/ year	г/(м² · год) g/(m² · year)			мм/ год mm/ year	г/(м² · год) g/(m² · year)
Байкуль Baikul	12,3	0,06	0,9	1080	31,1	0,16	2,4	1032	8,8	0,27	4,0	3040
Волжское Volzhskoye	3,3	0,15	1,5	1230	4,3	0,18	2,7	2295	1,2	0,26	3,9	1560
Карташихинское Kartashikhinskoye	53,4	0,15	2,2	2530	3,8	0,20	2,9	2407	0,9	0,30	4,5	2025
Круглое Krugloye	0,8	0,10	1,5	870	0,8	0,15	2,2	1210	–	–	–	–
Сайкуль Saykul	5,9	0,30	4,5	2115	–	–	–	–	–	–	–	–
Старое Staroye	4,8	0,05	0,8	680	50,0	0,27	4,0	2920	0,8	0,48	7,2	3096
Чебаркуль Chebarkul	20,3	0,05	0,8	1328	0,7	0,20	3,0	1380	1,9	0,36	5,4	3186
Атабаевское Atabaevskoye	0,9	0,16	2,4	816	0,2	0,27	4,0	1440	–	–	–	–
Ближнее Blizhneye	0,3	0,15	2,2	1606	0,1	0,25	3,7	1221	–	–	–	–
Большое Bolshoye	1,4	0,15	2,2	946	1,5	0,30	4,5	1935	–	–	–	–
Дальнее Dalneye	1,1	0,15	2,2	946	0,6	0,25	3,7	1332	–	–	–	–
Лиса Lisa	7,7	0,18	3,0	2190	7,2	0,40	5,9	2537	–	–	–	–

Примечание. S – занимаемая площадь; H – средняя толщина отложений; прочерк означает отсутствие в озере соответствующих глубин.
Note. S – occupied area; H – average thickness of sediments; dash – absence of the corresponding depths in the lake.

Таблица 3. Гранулометрический состав, плотность (ρ) и содержание ОВ в донных отложениях озер и почвах водосборных территорий
Table 3. Granulometric composition, density (ρ) and organic matter content in the lake sediments and soils of catchment areas

		Гранулометрический состав, % Particle size, %							ρ, г/см³ ρ, g/cm³	ОВ, % OM, %
		1–0,25 mm	0,25–0,05 mm	0,05–0,01 mm	0,01–0,005 mm	0,005–0,001 mm	<0,001 mm	<0,01 mm		
Донные отложения Sediments	<1 м	<u>1,6</u> 0,2–5,6	<u>56,2</u> 12,6–88,2	<u>24,3</u> 0,7–50,8	<u>4,4</u> 0,2–12,2	<u>6,6</u> 4,0–11,8	<u>7,5</u> 0,5–16,1	<u>18,5</u> 5,6–35,1	<u>0,94</u> 0,3–1,7	<u>2,7</u> 0,2–6,6
	1–2 м	<u>1,1</u> 0,9–1,2	<u>34,5</u> 13,9–90,8	<u>32,1</u> 3,0–59,4	<u>7,9</u> 0,2–15,1	<u>14,2</u> 4,8–19,2	<u>11,1</u> 0,1–21,7	<u>32,2</u> 5,0–47,8	<u>0,53</u> 0,3–1,2	<u>5,9</u> 0,5–12,1
	>2 м	<u>0,3</u> 0,1–0,5	<u>36,3</u> 0,7–73,7	<u>32,9</u> 12,6–52	<u>5,5</u> 0,7–12,5	<u>13,8</u> 4,9–24,7	<u>11,5</u> 4,1–27,3	<u>30,7</u> 12,9–64,5	<u>0,54</u> 0,3–1,1	<u>4,2</u> 1,7–5,7
Почвы водосборов Catchment soils		<u>3,6</u> 0,5–13,8	<u>48,0</u> 4,2–74,3	<u>25,1</u> 3,6–49,0	<u>5,6</u> 1,2–9,6	<u>8,7</u> 3,6–13,7	<u>9,0</u> 1,3–24,5	<u>23,3</u> 6,3–46,2	<u>1,11</u> 1,0–1,3	<u>4,0</u> 1,5–6,5

Примечание. В числителе – среднее, в знаменателе – пределы варьирования.
Note. The numerator – mean value, the denominator – the range; OM – organic matter.

Таблица 4. Скорость накопления органического углерода в донных отложениях озер по глубинам
Table 4. The rate of organic carbon accumulation in the bottom sediments of the lakes by depth

Озеро Lakes	г С/м ² · год g C/(m ² · year)			г СО ₂ /м ² · год g CO ₂ /(m ² · year)		
	<1 m	1–2 m	>2 m	<1 m	1–2 m	>2 m
Байкуль Baikul	4	34	55	15	125	202
Волжское Volzhskoye	38	37	52	139	136	191
Карташихинское Kartashikhinskoye	2	46	55	7	169	202
Круглое Krugloye	27	33	–	99	121	–
Сайкуль Saykul	89	–	–	326	–	–
Старое Staroye	14	64	80	51	235	293
Чебаркуль Chebarkul	8	52	86	29	191	315
Атабаевское Atabaevskoye	29	82	–	106	301	–
Ближнее Blizhneye	40	54	–	147	198	–
Большое Bolshoye	27	50	–	99	183	–
Дальнее Dalneye	27	64	–	99	235	–
Лиса Lisa	55	63	–	202	231	–
В среднем On average	29	53	66	106	194	242

Примечание. Прочерк означает отсутствие в озере соответствующих глубин.

Note. Dash – absence of the corresponding depths in the lake.

В мелководных, хорошо прогреваемых и сильно заросших изолированных от водохранилища отчлененных заливах (Сайкуль, Атабаевское) скорость накопления углерода также может достигать больших значений (>80 г С/м² · год). Зеленый пояс макрофитов в них не только эффективно задерживает поступающее с водосбора органическое вещество, но и сам при отмирании является основным поставщиком углерода в донные отложения.

Мелководья наиболее крупных озер заповедника выделяются крайне низкими значениями скорости накопления органического углерода. В таких больших по площади озерах, как Карташихинское, Чебаркуль и Байкуль, скорость накопления углерода в литорали не превышает 2–8 г С/м² · год. Вследствие особенностей рельефа дна органический материал выносится из слабозаросших мелководных зон в более глубокие участки озер, где аккумуляция С_{орг} достигает уже 34–86 г С/м² · год.

В пересчете на углекислый газ скорость аккумуляции ОВ в донных отложениях отчлененных заливов составляет в среднем

193 г СО₂/м² · год (табл. 4). Это примерно в 2,5 раза ниже, чем измеренные показатели эмиссии СО₂ с поверхности Куйбышевского водохранилища в акватории Саралинского участка заповедника – 487 г СО₂/м² · год [Никитин и др., 2025]. Таким образом, можно полагать, что в углеродном балансе исследуемых водоемов эмиссия углерода из донных отложений, которая осуществляется в форме углекислого газа и метана, преобладает над его депонированием. Как было показано на примере водоемов Чувашской Республики [Иванов и др., 2021], до 2/3 углерода, оседающего в донных отложениях, подвергается деструкции и минерализации.

Сравнительные оценки показывают, что соотношение между поступлением и эмиссией углерода в водоемах Саралинского участка Волжско-Камского заповедника и в озерах Чувашской Республики практически одинаково. Это дает основания полагать, что около 70 % органического углерода, аккумулирующегося в донных отложениях водоемов бассейна Средней Волги, подвергается минерализации и в виде газообразных СО₂ и СН₄ вновь

возвращается в природный биогеохимический круговорот.

В исследованных водоемах заповедника запасы углерода в донных отложениях, приходящиеся на единицу площади их ложа, имеют тенденцию к росту с увеличением глубины: 22 т С/га – на глубине <1 м, 28 т С/га – на глубинах от 1 до 2 м, 44 т С/га – >2 м, что в среднем составляет 31 т/га. Суммарные запасы C_{org} в донных отложениях всех 12 озер превышают 3 тыс. т, что в CO_2 -эквиваленте достигает 12 тыс. т (табл. 5).

Заключение

Впервые для нового типа озер, образовавшихся в результате отчленения от основной акватории заливов Куйбышевского водохранилища (Средняя Волга, Республика Татарстан), получены количественные оценки скоростей формирования донных отложений и аккумуляции органического углерода, установлен ряд закономерностей в проявлении указанных процессов, показана роль глубины и степени

изолированности водоема в формировании пула органического углерода в донных отложениях.

В структуре донных отложений озер, расположенных на территории Саралинского участка Волжско-Камского заповедника и его охранный зоны, доминирующее положение занимают песчанистые илы с содержанием ОВ до 12,1 %, что определяется значительным вкладом в их формирование терригенного материала соответствующего гранулометрического состава (пески, супеси, легкие суглинки) и почвенного гумуса. Толщина накопленного за период существования озер слоя донных отложений варьирует от 5 до 48 см, демонстрируя характерную пространственную дифференциацию: максимальные ее значения приурочены к центральным, относительно глубоким (до 3 м) участкам котловин, а минимальные – к прибрежным (до 1 м).

Скорости осадконакопления в отчлененных заливах лежат в диапазоне значений, характеризующих интенсивность аккумуляции осадков в разнотипных водоемах Средней Волги: 680–3186 г/м² · год или 0,8–7,2 мм/год.

Таблица 5. Запасы органического углерода в донных отложениях озер

Table 5. Stocks of organic carbon in the bottom sediments of the lakes

Озеро Lakes	Масса отложений, т Mass of sediment, t	Запасы Stocks							
		τ С t C	τ CO ₂ t CO ₂	τ С/га t C/ha			τ CO ₂ /га t CO ₂ /ha		
				<1 м	1–2 м	>2 м	<1 м	1–2 м	>2 м
Байкуль Baikul	48290	1061	3890	3	20	40	11	73	147
Волжское Volzhskoye	8301	349	1280	40	20	30	147	73	110
Карташихинское Kartashikhinskoye	1055	31	114	2	30	40	7	110	147
Круглое Krugloye	13996	304	1144	20	20	–	73	73	–
Сайкуль Saykul	99749	247	905	60	–	–	220	–	–
Старое Staroye	11785	270	990	9	40	50	33	147	183
Чебаркуль Chebarkul	21546	236	865	5	5	60	18	18	220
Атабаевское Atabaevskoye	632	26	95	20	20	–	73	73	–
Ближнее Blizhneye	2879	77	282	30	30	–	110	110	–
Большое Bolshoye	1215	45	165	20	30	–	73	110	–
Дальнее Dalneye	511	15	55	20	40	–	73	147	–
Лиса Lisa	22420	585	2145	30	50	–	110	183	–

Отмечена взаимосвязь между глубиной водоема и скоростью аккумуляции органического углерода в составе донных отложений, которая в среднем составила 29, 53 и 66 г С/м² · год для глубин <1 м, 1–2 м и >2 м соответственно. При этом высокие показатели скорости накопления С_{орг} также отмечены в мелководных озерах, отличающихся высокой степенью зарастания макрофитами, – до 89 г С/м² · год. В таких водоемах возрастает роль аутигенного ОВ в формировании общих его запасов в донных отложениях.

Согласно расчетам, запасы органического углерода в донных отложениях исследованных озер варьируют от 22 до 44 т/га и суммарно превышают 3 тыс. т С, или 12 тыс. т в СО₂-эквиваленте. Предварительные оценки показывают, что из общего количества углерода, осаждающегося в донных отложениях озер в процессе седиментации, не менее 70 % возвращается в биогеохимические циклы с восходящими со дна потоками углекислого газа и метана в результате деструкции и минерализации ОВ.

Литература

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
- Белкина Н. А. Количественный и качественный состав органического вещества и его трансформация в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 64–72. doi: 10.17076/lim467
- Белкина Н. А. Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. № 4. С. 263–276.
- ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
- ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества.
- Законнов В. В., Поддубный С. А., Законнова А. В., Касьянова В. В. Осадкообразование в зонах переменного подпора водохранилищ Волжского каскада // Водные ресурсы. 2010. № 4. С. 425–433.
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Кочетков Д. А. Генезис и морфометрические характеристики отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2024. № 4. С. 10–17. doi: 10.24852/2411-7374.2024.4.10.17
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021а. № 1. С. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021б. № 2. С. 47–52. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52
- Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011. № 2. С. 46–48.
- Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Исследование современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской возвышенности и низменного Заволжья // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 31–43. doi: 10.17076/lim844
- Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Пространственные закономерности накопления углерода, азота и фосфора в донных отложениях озер Чувашской республики // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 4. С. 108–118. doi: 10.17076/lim1402
- Мартынова М. В. Продукционно-деструктивные процессы в воде и аккумуляция веществ на дне озер и водохранилищ // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 6. С. 721–727.
- Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З. Оценка эмиссии парниковых газов от Куйбышевского водохранилища с использованием модели G-res // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы III Международной конференции. Казань: АН РТ, 2025. С. 459–464.
- ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32-02. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания сухого и прокаленного остатка в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом.
- Потехин М. С., Белкина Н. А., Богданова М. С., Мясникова Н. А., Морозова И. В., Гатальская Е. В., Орлов А. В., Пронина А. В. Особенности накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудская Ламба (заповедник «Кивач») // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 62–73. doi: 10.17076/lim2028
- Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А., Законнов В. В. Растительные пигменты и органическое вещество в донных отложениях крупных мелководных озер Северо-Запада России // Геохимия. 2022. Т. 67, № 12. С. 1285–1296. doi: 10.1134/s0016702922100081
- Хасанов Р. Р., Зиганшин И. И., Валиев В. С., Александрова А. Б. Показатели зарастания озер Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Биосфера. 2025. Т. 17, № 2. С. 75–82. doi: 10.24855/biosfera.v17i2.986
- Casas-Ruiz J. P., Bodmer P., Bona K. A., Butman D., Couturier M., Emilson E. J. S., Finlay K., Genet H., Hayes D., Karlsson J., Paré D., Peng C., Striegl R., Webb J., Wei X., Ziegler S., Giorgio P. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange // Nat. Commun. 2023. Vol. 14. Art. 1571. doi: 10.1038/s41467-023-37232-2

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // *Ecosystems*. 2007. No. 10. P. 171–184. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Friedlingstein P., Andrew R. M., Rogelj J., Peters G. P., Canadell J. G., Knutti R., Luderer G., Raupach M. R., Schaeffer M., van Vuuren D. P., Le Quér C. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets // *Nat. Geosci.* 2014. Vol. 7. P. 709–715. doi: 10.1038/ngeo2248

Mendonça R., Müller R. A., Clow D., Verpoorter Ch., Raymond P., Tranvik L. J., Sobek S. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. Art. 1694. doi: 10.1038/s41467-017-01789-6

Sobek S., Durisch-Kaiser E., Zurbügg R., Wongfun N., Wessels M., Pasche N., Wehrli B. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, iss. 6. P. 2243–2254. doi: 10.4319/lo.2009.54.6.2243

Tranvik L. J., Downing J., Cotner J., Loiselle S., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L. B., Kortelainen P., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D. M., McCallister S. L., McKnight D. M., Melack J. M., Overholt E., Porter J. A., Prairie Y., Renwick W. H., Roland F., Sherman B. S., Schindler D. W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M. J., Verschoor A. M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G. A. Lakes and impoundments as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, iss. 6. P. 2298–2314.

Ziganshin I., Ivanov D., Mukhametzyanova L. Estimation of organic carbon stocks in bottom sediments of Middle Kaban Lake (Kazan, Republic of Tatarstan) // *E3S Web of Conferences*. 2024. No. 555. Art. 01017. doi: 10.1051/e3sconf/202455501017

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir // *Российский журнал прикладной экологии*. 2025. № 2. С. 66–70. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

References

Arinushkina E. V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: MSU; 1970. 487 p. (In Russ.)

Belkina N. A. Features of the transformation process of organic substances in sediments of lakes in Karelia and its impact on the chemical composition of water. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov = Geopolitics and Eco-geodynamics of Regions*. 2019;4:263–276. (In Russ.)

Belkina N. A. Quantitative and qualitative composition of organic matter and its transformation in a surface layer of Lake Onego sediments. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;10:64–72. (In Russ.). doi: 10.17076/lim467

Belkina N. A. Role of sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:35–41. (In Russ.)

Casas-Ruiz J. P., Bodmer P., Bona K. A., Butman D., Couturier M., Emilson E. J. S., Finlay K., Gernet H., Hayes D., Karlsson J., Paré D., Peng C., Striegl R., Webb J., Wei X., Ziegler S., Giorgio P. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. *Nat. Commun.* 2023;14:1571. doi: 10.1038/s41467-023-37232-2

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*. 2007;10:171–184. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Friedlingstein P., Andrew R. M., Rogelj J., Peters G. P., Canadell J. G., Knutti R., Luderer G., Raupach M. R., Schaeffer M., van Vuuren D. P., Le Quér C. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. *Nat. Geosci.* 2014;7:709–715. doi: 10.1038/ngeo2248

GOST 5180–2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. (In Russ.)

GOST 26213–2021. Soils. Methods for determination of organic matter. (In Russ.)

GOST 12536–2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. (In Russ.)

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. A study of contemporary and historical sedimentation in waterbodies of the Volga upland and the Low-lying Trans-Volga region. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;9:31–43. (In Russ.). doi: 10.17076/lim844

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. Spatial regularities of carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in lake sediments of the Chuvash Republic. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;4:108–118. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1402

Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Assessment of the sedimentation rate in lakes of Kazan and Prikazansky region. *Georesursy = Georesources*. 2011;2:46–48. (In Russ.)

Khasanov R. R., Ziganshin I. I., Valiev V. S., Alexandrova A. B. Parameters of lakes overgrowing in the Saralinsky section of the Volzsko-Kamsky Reserve. *Biosfera = Biosphere*. 2025;17(2):75–82. (In Russ.). doi: 10.24855/biosfera.v17i2.986

Martynova M. V. Production-destruction processes in water and the accumulation of matter on the beds of lakes and reservoirs. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(6):721–727. (In Russ.)

Mendonça R., Müller R. A., Clow D., Verpoorter Ch., Raymond P., Tranvik L. J., Sobek S. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nat. Commun.* 2017;8:1694. doi: 10.1038/s41467-017-01789-6

Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Kuz'min R. S., Latypova V. Z. Assessment of greenhouse gas emissions from the Kuibyshev Reservoir using the G-res model. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly III Mezhdunarodnoi konferentsii = Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceed. III Int. conf.* Kazan: AN RT; 2025. P. 459–464. (In Russ.)

PND F 16.2.2:2.3:3.32-02. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the content of dry and calcined residue in solid and liquid wastes of production and consumption, sediments, sludge, activated sludge, bottom sediments by the gravimetric method. (In Russ.)

Potakhin M. S., Belkina N. A., Bogdanova M. S., Myasnikova N. A., Morozova I. V., Gatal'skaya E. V., Orlov A. V., Pronina A. V. Specific features of organic matter accumulation in bottom sediments of lake Chudesnaya Lamba (Kivach Nature Reserve). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025;12:62–73. (In Russ.). doi: 10.17076/lim2028

Sigareva L. E., Timofeeva N. A., Zakonnov V. V. Plant pigments and organic matter in the bottom sediments of large shallow lakes in northwestern Russia. *Geokhimiya = Geochemistry International*. 2022;67(12):1285–1296. (In Russ.). doi: 10.1134/s0016702922100081

Sobek S., Durisch-Kaiser E., Zurbrugg R., Wongfun N., Wessels M., Pasche N., Wehrli B. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(6):2243–2254. doi: 10.4319/lo.2009.54.6.2243

Tranvik L. J., Downing J., Cotner J., Loiselle S., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L. B., Kortelainen P., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D. M., McCallister S. L., McKnight D. M., Melack J. M., Overholt E., Porter J. A., Prairie Y., Renwick W. H., Roland F., Sherman B. S., Schindler D. W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M. J., Verschoor A. M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G. A. Lakes and impoundments as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(6):2298–2314.

Zakonnov V. V., Poddubnyi S. A., Zakonnova A. V., Kas'yanova V. V. Sedimentation in variable-backwater zones of the Volga chain reservoirs. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;4:425–433. (In Russ.)

Ziganshin I., Ivanov D., Mukhametzyanova L. Estimation of organic carbon stocks in bottom sediments of Middle Kaban Lake (Kazan, Republic of Tatarstan). *E3S Web of Conferences*. 2024;555:01017. doi: 10.1051/e3sconf/202455501017

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2025;2:66–70. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R. Genesis and morphometric characteristics of lakes in the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky Reserve. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2021;1:36–43. (In Russ.). doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R. Sedimentation in the lakes of the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky reserve. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2021;2:47–52. (In Russ.). doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Kochetkov D. A. Genesis and morphometric characteristics of separated bays of the Kazan region of the Kuibyshev Reservoir. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2024;4:10–17. (In Russ.). doi: 10.24852/2411-7374.2024.4.10.17

Поступила в редакцию / received: 02.09.2025; принята к публикации / accepted: 09.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зиганшин Ирек Ильгизарович

канд. геогр. наук, доцент,
старший научный сотрудник

e-mail: Irek.Ziganshin@tatar.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

д-р геогр. наук, заместитель директора
по научной работе

e-mail: water-rf@mail.ru

Хасанов Рустам Равилович

научный сотрудник

e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

Валиев Всеволод Сергеевич

старший научный сотрудник

e-mail: podrost@mail.ru

Александрова Асель Биляловна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: adabl@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Ziganshin, Irek

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor,
Senior Researcher

Ivanov, Dmitry

Dr. Sci. (Geog.), Deputy Director

Khasanov, Rustam

Researcher

Valiev, Vsevolod

Senior Researcher

Alexandrova, Asel

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher