УДК 504.455; 547.211 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93*

Оригинальная статья/Original paper

Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: исследование методом плавучих камер

О. В. Никитин[2], Н. Ю. Степанова[1], Л. В. Новикова[1], А. С. Гордеев[1], Р С. Кузьмин[2], В. З. Латыпова[1]

olnova@mail. ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
ООО «Экоаудит», г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Пресноводные экосистемы, в т. ч. водохранилища, вносят существенный вклад в глобальные выбросы парникового газа – метана (CH_4). Мелководные зоны водохранилищ считаются «горячими точками» эмиссии, однако их вклад в углеродный бюджет крупных водоемов, таких как Куйбышевское водохранилище, количественно оценен недостаточно. **Методы.** Проведена количественная оценка удельных потоков CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища в летне-осенний период 2024 г. методом плавучих камер. Концентрация CH_4 в пробах определялась на газовом хроматографе NEXIS GC-2030. Измерения проводились на двух станциях с контрастными условиями – открытом мелководье и полузамкнутой протоке с замедленным водообменом. Параллельно регистрировались гидрофизические и гидрохимические параметры, а также отбирались пробы донных отложений для анализа гранулометрического состава и содержания органического вещества. **Результаты.** Выявлена высокая пространственная вариабельность потоков CH_4. Средняя эмиссия на станции открытого мелководья составила 22,9 ± 3,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$, в полузамкнутой протоке на порядок выше – 231,8 ± 50,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$. Максимальные значения (до 623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) зафиксированы в июле и связаны с пузырьковым механизмом эмиссии на фоне придонной гипоксии (< 0,5 мг $O_2 \cdot дм^{-3}$). Установлено, что мелководные изолированные заливы, несмотря на малую площадь, вносят непропорционально большой вклад в общие выбросы CH_4 с акватории водохранилища. Данное явление обусловлено комплексом факторов: специфической морфометрией, способствующей термической и кислородной стратификации, а также аккумуляцией илистых осадков, обогащенных органическим веществом. Для точной оценки углеродного следа крупных водохранилищ необходим целенаправленный мониторинг подобных «горячих точек», что следует учитывать при разработке региональных и национальных углеродных бюджетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климатически активные газы, эмиссия, метан, CH_4, Куйбышевское водохранилище, плавучие камеры, мелководная зона, пузырьковый транспорт, диффузионный поток, углеродный цикл, горячие точки эмиссии

Финансирование: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Для цитирования: Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Новикова Л. В., Гордеев А. С., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З. Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: исследование методом плавучих камер // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 76–93. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93; EDN: CCLWGS

© Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Новикова Л. В., Гордеев А. С., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З., 2026

Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev reservoir: a floating chamber study

Oleg V. Nikitin[2], Nadezhda Y. Stepanova[1], Lyudmila V. Novikova[1], Aleksander S. Gordeev[1], Ruslan S. Kuzmin[2], Venera Z. Latypova[1]

olnova@mail.ru

Kazan Federal University, Kazan, Russia
Ekoaudit LLC, Kazan

ABSTRACT

Relevance. Freshwater ecosystems, including reservoirs, contribute significantly to global emissions of the greenhouse gas methane (CH_4). The shallow zones of reservoirs are considered emission hotspots; however, their contribution to the carbon budget of large water bodies, such as the Kuibyshev Reservoir, has not been sufficiently quantified. **Methods.** A quantitative assessment of specific CH_4 fluxes in the shallow zone of the Kuibyshev Reservoir was conducted during the summer-autumn period of 2024 using the floating chamber method. CH_4 concentration in the samples was determined by gas chromatography (Nexis GC-2030). Measurements were taken at two contrasting stations: an open shallow area (1) and a semi-enclosed channel with slow water exchange (2). Simultaneously, physical and chemical water parameters were recorded, and bottom sediment samples were collected for granulometric analysis and organic matter content determination. **Results.** High spatial variability of CH_4 fluxes was revealed. The average emission at the open shallow station was 22.9 ± 3.5 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$, while in the semi-enclosed channel, it was an order of magnitude higher: 231.8 ± 50.3 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$. The maximum values (up to 623.5 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$) were recorded in July at Station 2 and were associated with the ebullitive flux mechanism against the background of bottom hypoxia (< 0.5 mg $O_2 \cdot dm^{-3}$). Despite their small area, shallow isolated bays contribute disproportionately to the total CH_4 emissions from the reservoir's water surface. This phenomenon is determined by a combination of factors: specific morphometry that promotes thermal and oxygen stratification, and the accumulation of silty sediments enriched with organic matter. Accurate assessment of the carbon footprint of large reservoirs requires targeted monitoring of such hotspots, which should be taken into account when developing regional and national carbon budgets.

KEYWORDS: greenhouse gases, emissions, methane, CH_4, Kuibyshev Reservoir, floating chambers, shallow zone, ebullition, diffusive flux, carbon cycle, emission hotspots

Financing: The work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (No. FZSM-2024-0004).

For citation: Nikitin O. V., Stepanova N. Y., Novikova L. V., Gordeev A. S., Kuzmin R. S., Latypova V. Z. Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev reservoir: a floating chamber study. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 76–93. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93; EDN: CCLWGS

ВВЕДЕНИЕ

Значительный и все еще уточняемый вклад в глобальную эмиссию метана (CH_4) вносят пресноводные экосистемы [1]. Согласно современным оценкам, их выбросы могут превосходить прямые антропогенные источники, связанные с сельским хозяйством или энергетикой [2]. Особое место среди пресноводных систем занимают водохранилища – искусственные водоемы, созданные путем

зарегулирования рек. Они являются активными центрами трансформации органического вещества, где процессы анаэробного разложения в донных отложениях приводят к образованию CH_4 [3, 4]. Последние данные показывают, что на долю озер и водохранилищ приходится около 10 % глобальных выбросов CH_4 с потенциалом увеличения к концу века на 24–91 % в зависимости от сценария изменения климата [5], при этом потенциал метаногенеза в донных отложениях водохранилищ может многократно превосходить таковой в озерах и реках [6].

Эмиссия CH_4 из водохранилищ в атмосферу происходит по нескольким основным путям: это диффузионный и пузырьковый потоки, дегазация через турбины и водосбросы плотины ГЭС, а также эмиссия, опосредованная водными растениями [7]. В мелководных зонах, характеризующихся интенсивным прогревом и поступлением органического вещества, доминирующим механизмом часто является пузырьковый поток, что приводит к значительной пространственно-временной вариабельности потоков [8]. В то время как мировой опыт исследований эмиссии CH_4 из водохранилищ весьма обширен, для России, обладающей их значительным количеством, данные о потоках CH_4 в водохранилищах остаются фрагментарными [9] и недостаточными для построения точных региональных и национальных оценок [10].

Куйбышевское водохранилище – крупнейшее в каскаде и одно из крупнейших в мире – представляет собой значительный потенциальный источник парниковых газов в регионе [11], особенно в свете наблюдаемых климатических изменений в его бассейне [12]. Несмотря на появление первых обобщающих работ по эмиссии CH_4 в волжских водохранилищах [13], количественные оценки, специфичные для мелководных зон Куйбышевского водохранилища и основанные на прямых измерениях, по-прежнему немногочисленны. Высокая пространственно-временная изменчивость потоков, характерная для этих участков, требует организации более частых наблюдений для сбора репрезентативной статистики. Исследования, проводимые в рамках карбонового полигона «Карбон – Поволжье», нацелены на восполнение этого пробела [14].

Целью представленного в данной статье исследования стала количественная оценка удельных потоков CH_4 с акватории мелководной зоны Куйбышевского водохранилища методом плавучих камер. Задачи работы включали оценку пространственной и временной динамики потоков CH_4 на двух станциях, оценку влияния гидрофизических и гидрохимических параметров (температура, содержание растворенного кислорода) и выявление возможных механизмов эмиссии CH_4 (диффузия и пузырьковый поток).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Куйбышевское водохранилище расположено в Среднем Поволжье и Нижнем Прикамье европейской части России (рис. 1), создано в 1955–1957 гг. в результате строительства плотины Жигулевской ГЭС на р. Волге. Водохрани-

лище имеет сложную конфигурацию, занимает площадь 5900 км^2 при полном объеме 57,3 км^3 и характеризуется сезонным регулированием стока. Для водоема характерна высокая динамичность мелководной зоны [15].

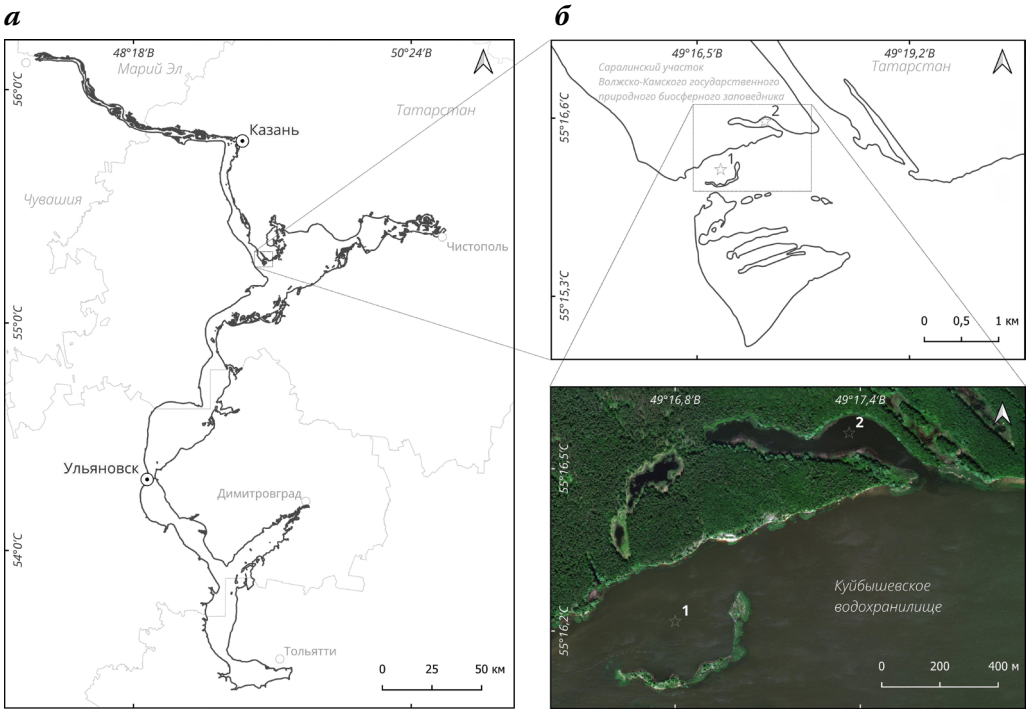


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдения в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: *а* – обзорная карта региона; *б* – акватория водного участка полигона «Карбон – Поволжье»; цифрами отмечены станции: 1 – открытое мелководье, 2 – полузамкнутая протока

Fig. 1. Location of the sampling sites in the shallow-water zone of the Kuibyshev Reservoir: left panel – overview map of the region; right panel – water area of the Volga Carbon Polygon. Numbers indicate stations: 1 – open shallow water, 2 – semi-enclosed channel

Исследования проводили в период с июня по сентябрь 2024 г. на двух станциях в пределах акватории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (рис. 1). Станция 1 (55°16′12″ с.ш., 49°16′52″ в.д.) расположена на открытом мелководье (глубины 2–4 м), подверженном ветровому и волновому воздействию. Станция 2 (55°16′34″ с.ш., 49°17′21″ в.д.) находится в полузамкнутой протоке с глубинами 1–4 м, берега которой полностью покрыты высшей водной растительностью.

Для характеристики донных отложений отбирали пробы поверхностного слоя с помощью штангового дночерпателя Заболоцкого, а с глубоководных участков – коробчатым дночерпателем ДАК-250. Гранулометрический состав определяли с помощью анализатора частиц Bluwave (Microtrac, США). Содержание органического вещества устанавливали по величине потерь при прокаливании (ППП, %). Всего за период исследований отобрано 46 проб: 12 – на станции 1, 34 – на станции 2.

Удельные потоки CH_4 определяли камерным методом [16, 17]. Ежемесячно на каждой станции использовали от 3 до 10 камер, равномерно распределенных по акватории. Измерения выполняли с лодки в светлое время суток (с 10:00 до 15:00 по местному времени, UTC+3). Использовали плавучие камеры из пластика объемом 0,008 м^3, изолирующие площадь водной поверхности 0,075 м^2 (рис. 2). Плавучесть и остойчивость обеспечивались поплавком из вспененного полиэтилена по периметру камеры, при установке края погружались на 2 см ниже уровня воды. Для предотвращения нагрева от солнечной радиации камеры экранировали алюминиевой фольгой. Каждая камера была оснащена пробоотборным портом с резиновой пробкой и защитным фильтром, соединенным с 50-сантиметровой ПВХ-трубкой (внешний диаметр 4 мм) и запорным краном типа «луер-лок».

Перед началом экспозиции вся пробоотборная линия прокачивалась окружающим воздухом для удаления остаточных газов. Каждая камера удерживалась на месте установки с помощью индивидуального якоря через отдельный поплавок, который служил буфером и стабилизатором. Такая конструкция исключала непосредственное механическое воздействие якоря на донные осадки в зоне измерения, предотвращая искусственную эмиссию пузырькового метана под камеру.

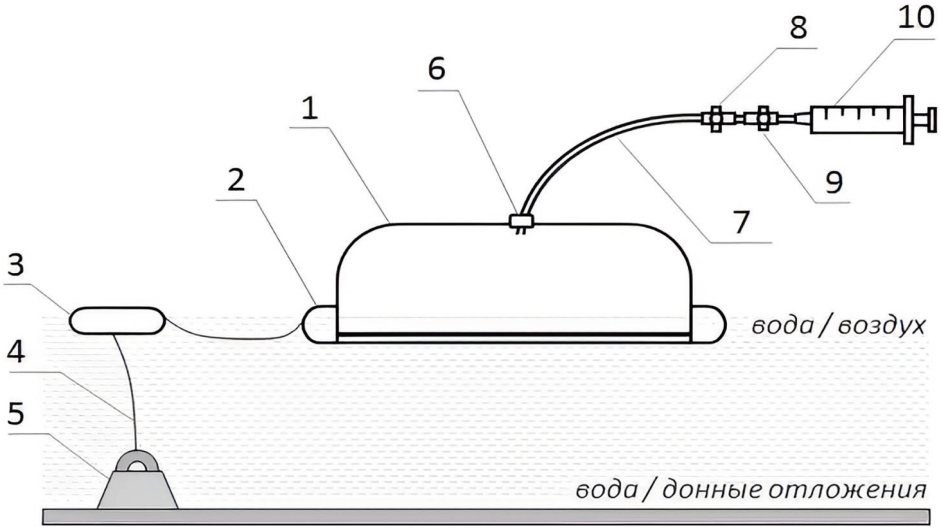


Рис. 2. Устройство плавающей камеры для оценки удельных потоков CH_4: 1 – корпус плавающей камеры, 2 – поплавок по периметру камеры, 3 – отдельный поплавок, 4 – соединяющий трос, 5 – якорь, 6 – резиновый уплотнитель, 7 – ПВХ-трубка, 8 и 9 – трехходовой запорный кран с соединением типа «луер-лок», 10 – полипропиленовый шприц для отбора воздушной пробы из внутреннего пространства камеры (представлены не в масштабе)

Fig. 2. Floating chamber design for CH_4 flux measurement: 1 – floating chamber body, 2 – peripheral float, 3 – additional float, 4 – connecting rope, 5 – anchor, 6 – rubber seal, 7 – PVC tube, 8 and 9 – three-way stopcock with a luer-lock connection, 10 – polypropylene syringe for air sample collection from the chamber headspace (not to scale)

На каждой станции камеры экспонировали одновременно в течение 30–60 мин. Пробы газа объемом 100 мл отбирали в момент начала (t_0) и окончания (t_1) экспозиции с использованием 150-миллиметровых полипропиленовых шприцев, снабженных трехходовым запорным краном. Перед отбором конечной пробы воздух в камере гомогенизировали путем пятикратного прокачивания через присоединенный шприц.

Параллельно с отбором газовых проб регистрировали координаты и глубину в точке установки (эхолот-картплоттер Humminbird 597cxi HD DI Combo, США), а также температуру и концентрацию растворенного кислорода в поверхностном и придонном слоях воды (оксиметр МАРК-303Э, Россия). Для метеопараметров использовались данные метеостанции.

Анализ проб на содержание CH_4 выполняли в течение 24 ч после отбора на газовом хроматографе Nexis GC-2030 (Shimadzu, Япония), оснащенном системой автоматического парофазного анализа HS-20 и программным обеспечением LabSolution. Стеклянные хроматографические виалы объемом 20 мл, загерметизированные бутилкаучуковыми пробками и алюминиевыми обжимными крышками, заполняли газовой фазой из шприца-пробоотборника методом вытеснения в сосуде, заполненном дегазированной дистиллированной водой.

Разделение компонентов проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND PLOT (Restek, США) длиной 30 м, с внутренним диаметром 0,53 мм, толщиной пленки неподвижной фазы 20 мкм. Концентрацию CH_4 (млн$^{-1}$) детектировали с помощью пламенно-ионизационного детектора. В качестве газа-носителя использовали гелий (чистотой 99,9999 %) при скорости потока 10 мл·мин$^{-1}$. Объем вводимой пробы составлял 10 мкл, общее время анализа – 5 мин на образец.

Удельный поток CH_4 (F_{CH4}, мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$) рассчитывали по изменению его концентрации в камере за время экспозиции с использованием формулы:

$$F_{CH_4} = \frac{\Delta C \times V \times P \times M}{\Delta t \times A \times R \times T},$$

где $\Delta C/\Delta t$ – скорость изменения концентрации CH_4 в камере (млн$^{-1}$·ч$^{-1}$);

V – объем камеры (0,008 м^3);

A – площадь покрытия водной поверхности (0,075 м^2);

P – атмосферное давление (Па);

M – молярная масса CH_4 (16,04 г·моль);

R – универсальная газовая постоянная (8,3145 м^3·Па·К$^{-1}$·моль$^{-1}$);

T – температура воздуха (К).

В формуле учтены коэффициенты: 10^{-6} – для перевода миллионных долей в безразмерные единицы, 24 – для пересчета почасового потока в суточный, 1000 – для представления результата в миллиграммах. Всего за период исследований выполнен 41 камерный эксперимент.

Статистическую обработку проводили в программе Statistica 10 (StatSoft, США). Корреляционный анализ выполняли с использованием коэффициента

ранговой корреляции Спирмена (r_S). Статистически значимыми считали значения при $p < 0{,}05$. Если не указано иного, данные представлены как среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего. Принято соглашение, согласно которому положительные значения потока соответствуют эмиссии CH_4 из воды в атмосферу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют высокую пространственную и временную изменчивость эмиссии CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища (таблица). На станции 1, расположенной на открытом мелководье, удельный поток CH_4 варьировал от 0 до 74,1 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$, составляя в среднем 22,9 ± 3,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ за весь период наблюдений. В отличие от нее, на станции 2, в полузамкнутой заросшей протоке, поток был в среднем на порядок выше (231,8 ± 50,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) и изменялся в более широком диапазоне значений – от 10,2 до 623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Таблица. Удельные потоки CH_4 (мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) на станциях мелководной зоны Куйбышевского водохранилища
Table. CH_4 fluxes (mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$) at the sampling sites in the shallow-water zone of the Kuibyshev Reservoir

Станция (n)	Дата съемки	Среднее	Медиана	Интервал величин	SD	SE
2 (9) *	30.06.2024	76,9	61,5	10,2–190,9	72,1	24,0
1 (3)	10.07.2024	41,1	30,7	18,6–74,1	29,2	16,8
2 (4)	10.07.2024	573,8	576,5	518,8–623,5	51,7	25,9
1 (10)	20.08.2024	21,1	15,0	8,4–40,1	13,8	4,4
2 (5)	20.08.2024	236,9	266,5	122,1–368,9	99,4	44,5
1 (8)	27.09.2024	18,4	18,3	0,0–29,4	9,7	3,4
1 (21)	10.07–27.09	22,9	18,6	0,0–74,1	16,2	3,5
2 (18)	30.06–20.08	231,8	172,6	10,2–623,5	213,2	50,3
1–2 (39)	30.06–27.09	119,3	33,8	0,0–623,5	177,8	28,5

Примечание: n – количество измерительных камер. * – в июне камеры на станции 2 устанавливали непосредственно в прибрежной литорали, в зарослях макрофитов; в последующие месяцы замеры проводили в акватории протоки на удалении от берега. Станция 1 на всех этапах работ располагалась на открытом мелководье. Для периодов (например, 10.07–27.09) приведена статистика по всем проведенным измерениям. SD – стандартное отклонение, SE – стандартная ошибка среднего.

Параллельные измерения выявили существенные различия в условиях на станциях, которые совпали по времени с периодами максимальной эмиссии CH_4. В июле, в период регистрации пиковых потоков, температура поверхности воды на станциях достигала 26,5–27,2 °C. При этом на станции 2 наблюдалась термическая и кислородная стратификация: температура у дна на глубине

4 м опускалась до 19,9 °C, а концентрация растворенного кислорода составляла всего 0,2 мг·дм$^{-3}$, создавая придонные анаэробные условия, способствующие метаногенезу. В то же время на станции 1 кислородный режим на схожей глубине был существенно благоприятнее, с концентрацией 9,6 мг·дм$^{-3}$ у поверхности и 5,7 мг·дм$^{-3}$ у дна.

Для определения движущих факторов эмиссии CH_4 был проведен корреляционный анализ. На станции 2 выявлены статистически значимые сильные связи: поток CH_4 демонстрировал положительную корреляцию с глубиной (r_S = 0,743, p < 0,001) и концентрацией кислорода у поверхности (r_S = 0,798, p < 0,001), а также сильную отрицательную корреляцию с концентрацией кислорода у дна (r_S = –0,818, p < 0,001). На станции 1 значимых корреляций с гидрофизическими и гидрохимическими параметрами не обнаружено. Для объединенной выборки (n = 39) подтверждается значимая отрицательная зависимость потока CH_4 от концентрации кислорода у дна (r_S = –0,692, p < 0,001).

Максимальные значения эмиссии на обеих станциях были зафиксированы в июле. В этот период на станции 2 был отмечен абсолютный максимум серии – 623,5 мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$. За период наблюдений также были зафиксированы два аномально высоких значения потока, которые не учитывались при расчете средних величин в таблице в силу их экстремальности и стохастической природы: 271,6 мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$ на станции 1 в июле и 4,82 г CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$ на станции 2 в августе. Оба случая, вероятно, связаны с эпизодами пузырьковой эмиссии.

Различия в режиме эмиссии между станциями также подтверждались прямыми натурными наблюдениями. На станции 2, наряду с высокими и экстремальными значениями потоков, регулярно визуально фиксировался выход пузырей газа на поверхность воды, что прямо указывает на значительный вклад пузырькового механизма. На станции 1 такие явления не наблюдались, что соответствует более низким и стабильным значениям потока, характерным для диффузионного переноса.

Любое водохранилище представляет собой сложную природно-техногенную систему, в которой процессы эмиссии и стока парниковых газов зависят от взаимодействия множества факторов. Гидрологические, физико-химические и биологические характеристики водохранилища оказывают существенное влияние на процессы газообмена, формируя пространственно-временные паттерны потоков парниковых газов. Эти закономерности отражают сложное взаимодействие экосистемных процессов, включая особенности уровенного режима, температурные градиенты и биологическую продуктивность [18, 19]. Среди них особое значение имеют морфометрические особенности водохранилища, термический и кислородный режимы, а также трофический статус водоема [20]. Совокупное действие этих параметров контролирует фундаментальные процессы углеродного цикла: разложение органического вещества (включая анаэробный метаногенез) и окисление CH_4 (преимущественно

аэробную метанотрофию), а также диффузионный и турбулентный перенос газов через границу «вода – атмосфера». Их влияние может быть прямым – как в случае стимуляции метаногенеза при дефиците кислорода, – так и косвенным, опосредованным изменением связанных физико-химических и биологических процессов.

Проведенное исследование показало значительную пространственную и временную изменчивость эмиссии CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища. Наблюдаемые закономерности определяются локальными условиями и в целом согласуются с данными по водохранилищам Волжско-Камского каскада [13] и водоемам умеренной зоны в целом [2].

Выявленное значительное различие в потоках между станциями обусловлено комплексом факторов, ключевым из которых, вероятно, является кислородный режим. Это находит прямое статистическое подтверждение: на станции 2 поток CH_4 демонстрировал сильную отрицательную корреляцию с концентрацией кислорода у дна ($r_S = -0{,}814$, $p < 0{,}001$), для объединенной выборки по обеим станциям эта зависимость также оставалась значимой и высокой ($r_S = -0{,}715$, $p < 0{,}001$). Выраженная придонная гипоксия (≤ 0,5 мг·дм$^{-3}$) на станции 2 создавала благоприятные условия для метаногенеза, что полностью согласуется с установленной ролью аноксии в интенсификации метаногенеза [21], что в сочетании с прогревом воды привело к максимальным значениям эмиссии. Летнее повышение температуры не только снижает растворимость CH_4, но и напрямую стимулирует образование CH_4 в донных отложениях [22], создавая двойной эффект. Напротив, более благоприятный кислородный режим на станции 1 (5,7 мг·дм$^{-3}$ у дна) не только выступал естественным ограничителем активности метаногенных архей, но и способствовал аэробному окислению CH_4 в водной толще. Этот процесс, в ходе которого метанотрофные микроорганизмы эффективно снижают эмиссию CH_4, окисляя его до CO_2 [23], играет важнейшую роль в уменьшении чистых выбросов CH_4 в мелководных водоемах [24].

Таким образом, кислородный режим, выступая в роли основного лимитирующего фактора, напрямую регулирует состав и функцию микробного сообщества, в конечном счете определяя баланс между продукцией и окислением CH_4 в водной толще [25], а имеющийся градиент условий наглядно демонстрирует, как локальные особенности могут формировать соседствующие «горячие точки» и зоны с умеренной эмиссией в пределах одной акватории.

Существенную роль в формировании выявленного контраста сыграли морфометрические особенности участков, которые предопределили различия в их гидродинамическом и трофическом режимах. Полузамкнутая протока станции 2, представляющая собой затопленную межгрядовую депрессию поймы, защищенную древесной растительностью от ветро-волнового воздействия, способствует аккумуляции богатых органическим веществом илистых наносов. О роли морфометрии косвенно свидетельствует и выявленная

на станции 2 положительная корреляция потока CH_4 с глубиной (r_S = 0,743, p < 0,001), что отражает усиление стратификации и аноксии в более глубоких частях протоки. Ограниченный водообмен с основной частью водохранилища и сниженная интенсивность циркуляции водных масс в условиях такой морфологии благоприятствуют развитию устойчивой стратификации и придонного дефицита кислорода [16], формируя тем самым комплекс предпосылок для интенсивного метаногенеза. Более того, аккумуляция органического вещества, служащего субстратом, формирует положительную обратную связь: его разложение в анаэробных условиях усиливает эмиссию CH_4 [3, 26].

В противоположность этому, открытая акватория станции 1 подвержена ветровому перемешиванию, характеризуется промывным режимом, интенсивной аэрацией и песчаными донными отложениями. Как показано в исследованиях водохранилищ Волжско-Камского каскада, в условиях постоянного перемешивания водной массы процессы аэробного окисления CH_4 протекают стабильно, практически независимо от колебаний кислородного режима [27]. Эти условия не благоприятствуют накоплению органического вещества и, что важно, способствуют аэробному окислению CH_4 как в толще воды, так и в донных отложениях [24], эффективно снижая его эмиссию. Следовательно, морфометрия участков водохранилища выступает важным фактором, влияющим на эмиссию CH_4 через контроль над аккумуляцией органического вещества и формирование локального кислородного режима.

Влияние морфометрии на аккумуляцию органического вещества подтверждается результатами грунтовых съемок. На станции 2 преобладали илистые осадки с высоким содержанием органического вещества (ППП: 1,2–16,3 %, медиана 8,5 %) и значительной долей пелитовой фракции (< 0,01 мм), в среднем составлявшей 11,5 ± 6 %. В прибрежной зоне этой станции отложения дополнительно обогащались лиственным опадом и неразложившимися растительными остатками высшей водной растительности. Это полностью согласуется с установленной для Куйбышевского водохранилища зависимостью, согласно которой содержание органического вещества закономерно возрастает в ряду «песок → илистый песок → ил», а основная доля органического углерода сосредоточена именно в тонкодисперсных фракциях [28]. Такие илистые, обогащенные органикой грунты, являются зонами максимальной потенциальной метаногенной активности в водохранилищах Волжско-Камского каскада [3]. В нашем случае на станции 1 преобладали песок и илистый песок с низким содержанием органического вещества (ППП: 1,0–9,6 %, медиана 1,4 %), что характерно для открытых акваторий водохранилища и что обусловливает преимущественно диффузионный путь эмиссии.

Отдельного внимания заслуживает потенциальный вклад водной растительности в общую эмиссию на станции 2. Довольно высокий поток, зафиксированный в июне в литорали, заросшей тростником (*Phragmites australis*

(Cav.) Trin. ex Steud.), может быть связан не только с пузырьковой эмиссией и диффузией из водной толщи, но и с дополнительным поступлением метана, опосредованным растениями. Хотя используемая методика не позволяет напрямую количественно разделить эти пути, расположение камер вблизи зарослей теоретически давало возможность уловить интегральный поток, который мог включать как диффузию метана, поступившего в воду из подводных частей растений, так и, потенциально, прямую эмиссию вблизи оснований стеблей. Помимо этого возможного прямого влияния, присутствие растительности могло косвенно усиливать эмиссию за счет создания дополнительного субстрата для метаногенеза через корневые экссудаты и отмершую биомассу [29], а также через удержание и накопление в прибрежной зоне аллохтонного органического вещества с водосбора [4].

Для водохранилищ Волжско-Камского каскада, в частности, показано, что массовое отмирание высшей водной растительности в конце лета приводит к формированию ярко выраженного пика метаногенеза в донных отложениях зарастающей литорали [27]. Следует отметить, что легкодоступное органическое вещество именно такого типа, в отличие от трудноразлагаемого опада наземных деревьев, рассматривается в качестве основного фактора, стимулирующего активность метаногенных архей в донных отложениях [30]. Более того, исследования показывают, что тростник обладает способностью к активному внутреннему транспорту газов (так называемому потоку под давлением – *pressurized flow*), что может делать его особенно эффективным каналом для поступления метана из донных отложений в атмосферу [31]. Таким образом, высшая водная растительность является потенциально значимым фактором, способным влиять на эмиссию через целый комплекс прямых и косвенных механизмов, что подчеркивает необходимость ее целенаправленного изучения в будущих исследованиях газового баланса мелководий водохранилища.

Выявленные различия в гидрофизических, гидрохимических и морфометрических условиях предопределяют доминирование различных механизмов эмиссии на участках исследования. Совокупность нескольких независимых признаков – значительно более высокие и вариабельные потоки, визуально наблюдаемый выход пузырей и экстремальные точечные выбросы (до 4,82 г $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) – явно указывает на преобладание пузырькового транспорта на станции 2. Полученные данные наглядно иллюстрируют тезис, согласно которому большая часть пузырькового потока обеспечивается небольшим количеством крупных, стохастических выбросов [32]. Это подчеркивает высокий риск недооценки эмиссии при недостаточно плотном отборе проб, поскольку непреднамеренное исключение подобных «горячих точек» может привести к значительному занижению общих выбросов. На станции 1, где потоки были умеренными и стабильными, вероятнее всего, преобладал диффузионный путь поступления CH_4 в атмосферу.

Полученные данные согласуются с картиной эмиссии, характерной как для основной акватории (1,5–71,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$), так и для пойменных участков и заливов (до 304–651 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) Куйбышевского водохранилища [13]. Наблюдаемые максимальные потоки на станции 2 (~ 624 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) близки к значениям, зарегистрированным в Черемшанском заливе, который также характеризуется летней гипоксией, вызванной плотностной стратификацией. Это подтверждает, что именно мелководные, изолированные и стратифицированные участки могут являться определяющими источниками пространственной вариабельности и, вероятно, вносят значительный вклад в общий бюджет эмиссии CH_4. Более того, морфология станции 2 (полузамкнутая протока – залив) является типичной для береговой зоны водохранилища, где широко распространены отчленившиеся заливы, сформировавшиеся в результате затопления эрозионных форм рельефа [33]. Сходство режимов между станцией 2 и другими изолированными акваториями водохранилища подтверждает, что мелководные изолированные участки, подверженные сезонной стратификации, могут представлять собой широко распространенный тип «горячих точек» эмиссии, а выявленная связь «стратификация – гипоксия – интенсивный метаногенез» может быть для них универсальной.

Диапазоны потоков для Куйбышевского водохранилища (0–623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) соответствуют, в том числе, общемировым данным [2] для мезотрофных (4,3–392,0 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) и эвтрофных (6,4–2296,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) водоемов. При этом максимальные значения эмиссии, вероятно связанные с пузырьковым транспортом, хорошо попадают в диапазон, типичный для пузырькового потока эвтрофных водохранилищ (0,0–734,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$), что позволяет считать режим эмиссии CH_4 Куйбышевского водохранилища типичным для водоемов своего класса.

Сопоставимость полученных принципиально разными методами данных служит важным подтверждением надежности оценок эмиссии [1]. Так, измерения методом турбулентных пульсаций, выполненные на акватории станции 1 (среднее ± стандартное отклонение), показали средние значения потока 52,84 ± 22,49 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в августе и 47,53 ± 27,06 $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в сентябре 2024 г. [11]. Эти величины хорошо согласуются с диапазоном значений, полученных нами в те же месяцы методом плавучих камер (до 40,1 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$). Совпадение данных, полученных с помощью точечного камерного метода и интегрального метода вихревой ковариации, подтверждает достоверность этих результатов.

ВЫВОДЫ

Проведенное методом плавучих камер исследование позволило количественно оценить эмиссию CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища и выявить контролирующие ее ключевые факторы. В рамках проведенной работы подтверждена гипотеза о чрезвычайно высокой пространственной

неоднородности потоков CH_4. Наличие в пределах одной акватории участков с эмиссией, различающейся на порядок (от ~ 23 до ~ 232 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в среднем), демонстрирует невозможность простой экстраполяции точечных замеров на всю акваторию без учета типа биотопа.

Доминирующим фактором, определяющим интенсивность эмиссии, является кислородный режим, который, в свою очередь, тесно связан с морфометрией и гидродинамикой участка. Изолированные, стратифицированные и обогащенные органическим веществом мелководья (такие как протоки и заливы) являются «горячими точками» эмиссии CH_4, где доминирует пузырьковый механизм транспорта. Полученные данные подтверждают, что для точной оценки углеродного следа крупных равнинных водохранилищ, помимо основной акватории, необходимо проводить целенаправленный мониторинг именно мелководных зон, особенно участков с признаками стратификации и гипоксии.

Для будущих исследований целесообразно включение суточной динамики измерений, количественное разделение путей эмиссии (диффузия, пузырьковый перенос, транспорт через сосудистые растения) и масштабирование полученных данных с использованием ГИС-технологий и дистанционного зондирования для построения более точной карты эмиссии CH_4 со всей акватории водохранилища.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no conflict of interest.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему преподавателю К. О. Потапову и аспиранту К. А. Шевчуку (Казанский федеральный университет) за неоценимую помощь в организации и проведении полевых работ.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Senior Lecturer K. O. Potapov and Post-graduate Student K. A. Shevchuk for their invaluable assistance in the works' organization and conducting.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saunois M., Martinez A., Poulter B. et al. Global methane budget 2000–2020 // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17 (5). P. 1873–1958. https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025
2. Rosentreter J. A., Borges A. V., Deemer B. R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. Vol. 14 (4). P. 225–230. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2
3. Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 187 с.

4. Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Косолапов А. Е. и др. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72
5. Bastviken D., Johnson M. S. Future methane emissions from lakes and reservoirs // Nature Water. 2025. https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6
6. Bodmer P., Bors C., Liu L., Lorke A. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers // Limnology and Oceanography. 2025. Vol. 70 (6). P. 1561–1574. https://doi.org/10.1002/lno.70063
7. Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I. et al. Reservoir Greenhouse gas emissions at Russian HPP // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49 (1). P. 33–39. https://doi.org/10.1007/s10749-015-0569-3
8. Moras S., Zellmer U. R., Hiltunen E., Grasset C., Sobek S. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2024. Vol. 129(1). https://doi.org/10.1029/2023jg007463
9. Гречушникова М. Г., Школьный Д. И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5
10. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. М: Институт глобального климата и экологии, 2023. 345 с.
11. Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Aukhadeev T. R., Latypova V. Z. Greenhouse gas fluxes (CH4, CO2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study // Limnology and Freshwater Biology. 2025. № 4. P. 995–1012. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995
12. Селезнев В. А. Межгодовые изменения водности реки Волги в условиях глобальных климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 7–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-7-21
13. Гречушинкова М. Г., Репина И. А., Фролова Н. Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060055
14. Латыпова В. З., Степанова Н. Ю., Кондратьева Т. А., Никитин О. В. Мониторинг поверхностных вод Куйбышевского водохранилища в районе водного участка полигона «Карбон – Поволжье» // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 4 (36). С. 39–49. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49
15. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
16. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochemical Cycles. 2004. Vol. 18 (4). GB4009. https://doi.org/10.1029/2004gb002238
17. Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
18. Hansen C. H., Matson P. G., Griffiths N. A. Diversity in reservoir surface morphology and climate limits ability to compare and upscale estimates of greenhouse gas emissions // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 893. Iss. 164851. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164851
19. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Косолапов А. Е., Усова Е. В., Анпилова Е. Л. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 37–50. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50
20. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С. и др. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100

21. Maruya Y., Nakayama K., Sasaki M., Komai K. Effect of dissolved oxygen on methane production from bottom sediment in a eutrophic stratified lake // Journal of Environmental Sciences. 2023. Vol. 125. P. 61–72. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.025
22. Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales // Nature. 2014. Vol. 507 (7493). P. 488–491. https://doi.org/10.1038/nature13164
23. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // Environmental Microbiology Reports. 2009. Vol. 1 (5). P. 285–292. https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
24. Martinez D., Anderson M. A. Methane production and ebullition in a shallow, artificially aerated, eutrophic temperate lake (Lake Elsinore, CA) // Science of The Total Environment. 2013. Vol. 454–455. P. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.040
25. Grasset C., Mendonça R., Villamor Saucedo G. et al. Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter // Limnology and Oceanography. 2018. Vol. 63 (4). P. 1488–1501. https://doi.org/ 10.1002/lno.10786
26. Beaulieu J. J., DelSontro T., Downing J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century // Nature Communications. 2019. Vol. 10 (1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5
27. Дзюбан А. Н. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества // Труды Института биологии внутренних вод. 2016. № 74 (77). С. 21–36. https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008
28. Законнов В. В., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. и др. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 72–89. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
29. Bodmer P., Vroom R. J. E., Stepina T., del Giorgio P. A., Kosten S. Methane dynamics in vegetated habitats in inland waters: quantification, regulation, and global significance // Frontiers in Water. 2024. Vol. 5. Iss. 1332968. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
30. Emilson, E. J. S., Carson M. A., Yakimovich K. M. et al. Climate-driven shifts in sediment chemistry enhance methane production in northern lakes // Nature Communications. 2018. Vol. 9 (1). Iss. 1801. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04236-2
31. van den Berg M., van den Elzen E., Ingwersen J. et al. Contribution of plant-induced pressurized flow to CH4 emission from a Phragmites fen // Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (1). Iss. 12304. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69034-7
32. DelSontro T., McGinnis D F., Wehrli B., Ostrovsky I. Size does matter: importance of large bubbles and small-scale hot spots for methane transport // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49 (3). P. 1268–1276. https://doi.org/10.1021/es5054286
33. 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 // Russian Journal of Applied Ecology. 2025. No. 2 (42). P. 66–70. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.66.70

REFERENCES

1. Saunois M., Martinez A., Poulter B. et al. Global methane budget 2000–2020. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17 (5). P. 1873–1958. https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025
2. Rosentreter J. A., Borges A. V., Deemer B. R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience.* 2021. Vol. 14 (4). P. 225–230. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2
3. Dziuban A. N. Destruction of organic matter and the methane cycle in bottom sediments of internal water bodies. Yaroslavl: Printhouse, 2010. 187 p. (In Russ.).

4. Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Kosolapov A. E. et al. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk Reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies*, Management. 2024. No. 3. P. 68–72. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72
5. Bastviken D., Johnson M. S. Future methane emissions from lakes and reservoirs. Nature Water. 2025. https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6
6. Bodmer P., Bors C., Liu L., Lorke A. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers. *Limnology and Oceanography.* 2025. Vol. 70 (6). P. 1561–1574. https://doi.org/10.1002/lno.70063
7. Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I. et al. Reservoir Greenhouse gas emissions at Russian HPP. *Power Technology and Engineering.* 2015. Vol. 49 (1). P. 33–39. https://doi.org/10.1007/s10749-015-0569-3
8. Moras S., Zellmer U. R., Hiltunen E., Grasset C., Sobek S. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.* 2024. Vol. 129 (1). https://doi.org/10.1029/2023jg007463
9. Grechushnikova M. G., Shkolniy D. I. Estimation of methane emission from reservoirs of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2019. No. 2. P. 58–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5
10. Assessment of greenhouse gas fluxes in ecosystems of the Russian Federation regions. M.: Institute of Global Climate and Ecology, 2023. 345 p. (In Russ.).
11. Nikitin O. V., Stepanova N. Y., Aukhadeev T. R., Latypova V. Z. Greenhouse gas fluxes (CH_4, CO_2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study. *Limnology and Freshwater Biology.* 2025. № 4. P. 995–1012. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995
12. Seleznev V. A. Inter/annual changes in the Volga River water content under global climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 6. P. 7–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-7-21
13. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Frolova N. L. et al. Methane concentration and fluxes in Volga River reservoirs. *Newsletters of the Russian Academy of Sciences. Series Geography.* 2023. Vol. 87 (6). P. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060055 (In Russ.).
14. Latypova V. Z., Stepanova N. Y., Kondratieva T. A., Nikitin O. V. Monitoring of Kuibyshev reservoir surface water in the area of the "Carbon – Povolgye" polygon water section. *Russian Journal of Applied Ecology.* 2023. No. 4 (36). P. 39–49. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49
15. Kuibyshev Reservoir (scientific information guide) / ed. by G. S. Rozenberg, L. A. Vykhristiuk. Togliatti: IEVB RAS, 2008. 123 p. (In Russ.).
16. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles.* 2004. Vol. 18 (4). GB4009. https://doi.org/10.1029/2004gb002238
17. Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology.* 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
18. Hansen C. H., Matson P. G., Griffiths N. A. Diversity in reservoir surface morphology and climate limits ability to compare and upscale estimates of greenhouse gas emissions. *Science of The Total Environment.* 2023. Vol. 893. Iss. 164851. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164851
19. Gar'kusha D., Fedorov Y., Kosolapov A., Usova E., Anpilova E. The factors of methane concentrations and emission fluxes formation analysis in water reservoirs. *Anthropogenic Transformation of Nature.* 2024. Vol. 10(1). P. 37–50. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50
20. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S. et al. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 2. P. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
21. Maruya Y., Nakayama K., Sasaki M., Komai K. Effect of dissolved oxygen on methane production from bottom sediment in a eutrophic stratified lake. *Journal of Environmental Sciences.* 2023. Vol. 125. P. 61–72. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.025

22. Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*. 2014. Vol. 507 (7493). P. 488–491. https://doi.org/10.1038/nature13164
23. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental Microbiology Reports.* 2009. Vol. 1 (5). P. 285–292. https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
24. Martinez D., Anderson M. A. Methane production and ebullition in a shallow, rtificially aerated, eutrophic temperate lake (Lake Elsinore, CA). *Science of The Total Environment.* 2013. Vol. 454–455. P. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.040
25. Grasset C., Mendonça R., Villamor Saucedo G. et al. Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter. *Limnology and Oceanography.* 2018. Vol. 63 (4). P. 1488–1501. https://doi.org/ 10.1002/lno.10786
26. Beaulieu J. J., DelSontro T., Downing J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*. 2019. Vol. 10 (1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5
27. Dziuban A. N. The methane cycle and their role in the destruction of organic matter in sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Proceedings of the Institute of Inland Waters Biology.* 2016. No. 74 (77). P. 21–36. https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008
28. Zakonnov V. V., Ivanov D. V., Khasanov R. R. et al. Spatial-temporal transformation of the Volga Reservoirs' soil complex. Communication 6. The Kuybyshev Reservoir bottom sediments and their mapping with the use of geo/information techniques. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Managment.* 2019. No. 2. P. 72–89. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
29. Bodmer P., Vroom R. J. E., Stepina T., del Giorgio P. A., Kosten S. Methane dynamics in vegetated habitats in inland waters: quantification, regulation, and global significance. *Frontiers in Water.* 2024. Vol. 5. Iss. 1332968. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
30. Emilson E. J. S., Carson M. A., Yakimovich K. M. et al. Climate-driven shifts in sediment chemistry enhance methane production in northern lakes. *Nature Communications.* 2018. Vol. 9 (1). Iss. 1801. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04236-2
31. van den Berg M., van den Elzen E., Ingwersen J. et al. Contribution of plant-induced pressurized flow to CH4 emission from a Phragmites fen. *Scientific Reports.* 2020. Vol. 10 (1). Iss. 12304. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69034-7
32. DelSontro T., McGinnis D. F., Wehrli B., Ostrovsky I. Size does matter: importance of large bubbles and small-scale hot spots for methane transport. *Environmental Science & Technology.* 2015. Vol. 49 (3). P. 1268–1276. https://doi.org/10.1021/es5054286
33. 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. *Russian Journal of Applied Ecology. 2025*. No. 2 (42). P. 66–70. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.66.70

Сведения об авторах:

Никитин Олег Владимирович, канд. геогр. наук, доцент, инженер-эколог, ООО «Экоаудит», 420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17; https://orcid.org/0000-0002-6753-0597; e-mail: olnova@mail.ru. Корреспондирующий автор.

Степанова Надежда Юльевна, д-р биол. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0003-1733-9062; e-mail: step090660@yandex.ru

Новикова Людмила Викторовна, ассистент, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-8158-8525; e-mail: ljudmila_88@list.ru

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-1918-305X; e-mail: drgor@mail.ru

Кузьмин Руслан Сергеевич, директор, ООО «Экоаудит», 420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17; https://orcid.org/0009-0007-5491-1167; e-mail: ecotexp@yandex.ru

Латыпова Венера Зиннатовна, д-р хим. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-8490-6939; e-mail: ecoanrt@yandex.ru

About the authors:

Oleg V. Nikitin, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Environmental Engineer, Ekoaudit LLC, Russia, 420061, Kazan, Sechenova St., 17; https://orcid.org/0000-0002-6753-0597; e-mail: olnova@mail.ru

Nadezhda Yu. Stepanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0003-1733-9062; e-mail: step090660@yandex.ru

Ludmila V. Novikova, Assistant, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-8158-8525; e-mail: ljudmila_88@list.ru

Aleksander S. Gordeev, Research Fellow, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-1918-305X; e-mail: drgor@mail.ru

Ruslan S. Kuzmin, Director, Ekoaudit LLC, Russia, 420061, Kazan, Sechenova St., 17; https://orcid.org/0009-0007-5491-1167; e-mail: ecotexp@yandex.ru

Venera Z. Latypova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-8490-6939; e-mail: ecoanrt@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 17.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2025.
Принята к публикации / Accepted 28.01.2026.