УДК 556.06; 574 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114*

Оригинальная статья/Original paper

Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров

В. А. Ломов[1], **М. Г. Гречушникова**[1,2]

lomson620@mail.ru

[1] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Водохранилища являются антропогенными источниками поступления парниковых газов в атмосферу. Работа посвящена гидроэкологическому моделированию Цимлянского водохранилища и определению характерных значений эмиссии метана с его поверхности. Метан, несмотря на его небольшую концентрацию в воздухе, обладает высоким потенциалом глобального потепления. На Цимлянском водохранилище метод оценки эмиссии метана, включающий и натурные данные, и математическое моделирование, ранее не применялся. **Методы.** Модель была откалибрована с использованием данных натурных наблюдений 2023–2024 гг. Инструментальное определение эмиссии проводилось методом «плавучих камер», пробы обработаны на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2». Комплекс полевых работ включал изучение характеристик донных отложений, распределения температуры воды и растворенного кислорода в водной толще. **Результаты.** По полученным данным и результатам выявлена межгодовая изменчивость содержания и удельного потока метана, связанная с особенностями гидрологической структуры водоема в зависимости от погодных условий, а также пространственная изменчивость, обусловленная различием характера донных отложений и глубины станций. Модель показала адекватную степень воспроизведения температурного и кислородного режимов, а также сходимость временного хода удельных потоков метана между численными экспериментами и натурными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водная экосистема, Цимлянское водохранилище, метан, удельные потоки метана, донные отложения, температура воды, растворенный кислород, гидроэкологическое моделирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме «Гидрологический режим и экологическое состояние водных объектов суши в условиях современного и будущего климата и антропогенного воздействия»; полевые данные получены в рамках проекта «Карбоновый полигон “Цимлянское водохранилище”» М7.7/08-18-24.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ломов В. А., Гречушникова М. Г. Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 94–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114; EDN: NZZNCT

© Ломов В. А., Гречушникова М. Г., 2026

Modeling of methane emission from Tsimlyansk reservoir with various set of input parameters

Victor A. Lomov[1], **Maria G. Grechushnikova**[1,2]

lomson620@mail.ru

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *Institute of Water Problems, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Reservoirs are anthropogenic sources of greenhouse gases emitted into the atmosphere. This work is devoted to hydroecological modeling of the Tsimlyansk Reservoir and determination of characteristic values of methane emissions from its surface. Methane, despite its low concentration in the air, has a high global warming potential. At the Tsimlyansk Reservoir, a method for estimating methane emissions, incorporating both in-situ data and mathematical modeling, has not previously been used. **Methods.** The model was calibrated using in situ observation data from 2023–2024. Instrumental determination of emissions was carried out using the "floating chamber" method, and samples were processed on a Chromatec-Crystal 5000.2 chromatograph. The fieldwork included studying the characteristics of bottom sediments, water temperature and dissolved oxygen profiles in the water column. **Results.** Based on the data and results obtained, interannual variability in methane content and specific flux was identified, related to the reservoir's hydrological structure and weather conditions, as well as spatial variability due to differences in the nature of bottom sediments and station depths. The model demonstrated adequate reproduction of temperature and oxygen conditions, as well as convergence in the time course of specific methane fluxes between numerical experiments and field data.

KEYWORDS: aquatic ecosystem, Tsimlyansk reservoir, methane, specific methane fluxes, bottom sediments, water temperature, dissolved oxygen, hydro/ecological modeling

FINANCING: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the MSU on the topic "Hydrological regime and ecological state of water bodies on land in conditions of current and future climate and anthropogenic impact"; the field data was obtained within the framework of the Carbon landfill project "Tsimlyansk reservoir" M7.7/08-18-24.

FOR CITATION: Lomov V. A., Grechushnikova M. G. Modeling of methane emission from Tsimlyansk reservoir with various set of input parameters. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 3. P. 94–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114; EDN: NZZNCT

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища являются важным компонентом энергосистемы Российской Федерации и, как и естественные водные объекты, источниками эмиссии метана. Оценки эмиссии метана с водохранилищ мира значительно различаются – от 2 до 122 Тг/год [1, 2]. Наиболее современная оценка глобальной эмиссии метана с водохранилищ мира в различных природных зонах [3] при сравнении с данны-

ми измерений на некоторых водохранилищах России показывает существенное расхождение результатов [4]. Многофакторность процесса эмиссии затрудняет параметризацию удельного потока метана и его диагностические и прогностические расчеты по данным единичных или нерегулярных измерений [5].

Основным фактором поступления метана в слабопроточном водохранилище при отсутствии значительных источников загрязнения является анаэробное разложение органического вещества как аллохтонного, так и автохтонного происхождения [6, 7]. Метан, образованный посредством жизнедеятельности архей-метаногенов, поступает к поверхности водоема в виде двух основных составляющих потока – диффузионного и пузырькового [8]. Диффузионный перенос метана в водной толще имеет небольшую скорость (коэффициент диффузии ~ 10^{-5} см^2/с), но главный фактор, ограничивающий его выход в атмосферу, – это микробное аэробное окисление [9]. Пузырьковый перенос возникает при перенасыщении порового раствора донных отложений метаном, резко снижает окисление, поскольку время подъема пузырька через кислородсодержащий слой составляет минуты, а то и секунды [10]. Так как растворимость газов чувствительна к гидростатическому давлению столба воды, в водохранилищах возможны проявления интенсивных пузырьковых выбросов, сопряженные с регулированием уровня воды [11]. Кроме того, в отличие от незарегулированных озер, для водохранилищ характерна дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф [12]. Весенний выброс метана, вызванный вскрытием ледяного покрова, также наблюдается на водохранилищах умеренной зоны [13].

Измерения удельного потока метана с водохранилищ ПАО «РусГидро», расположенных в различных регионах России, выявили значительный региональный и сезонный разброс значений эмиссии [14]. Несмотря на проведение по инициативе компаний МКПАО «Эн+ Груп» и ПАО «РусГидро» масштабных полевых работ в 2020–2023 гг. и пополнение банка данных сведениями об удельном потоке метана на водохранилищах России, по-прежнему остались малоизученными вопросы о его временной и пространственной неоднородности. Для уточнения оценок эмиссии метана из Цимлянского водохранилища авторами использована модель LAKE [15], которая при калибровке по результатам полевых данных с достаточной точностью воспроизводит сезонные изменения потока метана и позволяет оценить его эмиссию для периодов с различными погодными и гидрологическими условиями.

Помимо модели LAKE в мировом научном сообществе применяются и другие математические модели, которые включают блок биохимических расчетов. Так, например, на базе широко известной модели Delft3D разработан блок биохимических уравнений Delft3D-WAQ[1], однако данная модель из-за своей трехмерной структуры требует большого количества вычислительных ресурсов и не

1 D-Water Quality. User Manual for Delft3D-WAQ. [Электр. ресурс]. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/D-Water_Quality_User_Manual.pdf (дата обращения: 01.08.2024).

может быть использована для многочисленных запусков на длительный период времени с учетом калибровки внутренних параметров модели. Другая распространенная модель озерной экосистемы GLM-AED включает широкий перечень биохимических параметров [16], но для оценок временной динамики удельных потоков метана в атмосферу с поверхности водоемов данная модель не применялась. Модель LAKE, в свою очередь, уже успешно апробирована для расчетов годовой эмиссии метана с разнотипных водохранилищ [15, 17, 18]. Кроме того, авторы имеют непосредственный доступ к внутреннему коду модели и хорошо владеют ее инструментарием.

Цимлянское водохранилище в данной работе рассматривается как объект апробации методики оценки эмиссии метана из водоема с помощью математического моделирования при небольшом числе натурных данных. Это один из крупнейших водоемов на юге Европейской территории России, аккумулирующий сток р. Дон. В пределах его акватории находятся различные типы аквальных комплексов, что выражается в большой пространственной изменчивости характеристик водной экосистемы. Цимлянское водохранилище отличается от водохранилищ Нижней Волги большим периодом водообмена (коэффициент водообмена у Саратовского и Волгоградского водохранилищ 17,97 и 7,57 год$^{-1}$ соответственно, а у Цимлянского – 0,83 год$^{-1}$ [19]), что создает предпосылки формирования бескислородных условий в придонных слоях воды. На Дону отсутствует столь же большой каскад водохранилищ, как на Волге. Хотя многие его притоки зарегулированы, но водохранилища на них имеют небольшую регулирующую емкость и не оказывают такое значительное влияние на приток наносов, как, например, на Нижней Волге. Поэтому режим Цимлянского водохранилища, донные отложения и характерные значения удельного потока метана значительно отличаются от Волгоградского водохранилища [14, 20].

На Цимлянском водохранилище с 2023 г. функционирует карбоновый полигон, в число задач которого входит накопление данных измерений в различные сезоны. После публикации материалов эти данные возможно использовать для более детальной верификации модели. Результаты первичных исследований эмиссии метана, проведенных сотрудниками ИФА РАН и ФГБУ РосНИИВХ, опубликованы в [20] и выявили значительную пространственную неоднородность удельного потока метана на акватории Цимлянского водохранилища. Цель представленной в статье работы – апробация расчета эмиссии метана с Цимлянского водохранилища на модели LAKE, ее верификация и сравнение с результатами расчета эмиссии метана по натурным данным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цимлянское водохранилище на р. Дон образовано в 1952 г. Цимлянской плотиной. Мелководная зона с глубинами до 2 м занимает при НПУ ~ 10 % его площади [21]. Ледостав на Цимлянском водохранилище наблюдается с сере-

дины декабря по конец марта, весной верхний участок быстрее освобождается ото льда из-за притока паводковых вод, а осенью приплотинный участок замерзает почти на месяц позже, чем верховья. Наибольшие градиенты температуры воды (до 1,5 °С/м) отмечаются в июне и в июле. Ежегодно на Цимлянском водохранилище фиксируется «цветение» воды вследствие интенсивного роста водорослей, при этом в поверхностных слоях наблюдается перенасыщение воды кислородом. В придонных горизонтах дефицит кислорода присутствует регулярно в конце июля – начале августа.

Донные отложения в Цимлянском водохранилище представлены различными фракциями: мелкий песок, илистый песок, песчанистый и глинистый ил. В нижнем районе водоема на затопленной пойме происходит накопление отмерших моллюсков, приводящее местами к формированию слоя, сложенного раковинами с содержанием ила. На верхнем участке водохранилища отложения накапливаются за счет наносов, поступающих с речным стоком Дона, на среднем и нижнем – за счет береговой абразии [22].

Для проведения работы обобщены данные натурных наблюдений комплексных полевых съемок водоема в периоды с 27 сентября по 1 октября 2023 г. и с 7 по 10 сентября 2024 г., полученные в ходе экспедиций карбонового полигона «Цимлянское водохранилище». Схема расположения станций представлена на рис. 1. Измерение удельного потока метана производили методом «плавучих камер» с известными объемом и площадью основания, которые экспонировались на водной поверхности 20 мин. Воздух из камер в начале



Рис. 1. Схема расположения станций измерений

Fig. 1. The scheme of observation stations placement

и конце экспозиции отбирался шприцом с трехходовым краном в склянки объемом 20 мл, предварительно заполненные насыщенным раствором NaCl. Значения удельного потока метана определяли по разности концентрации метана в камере в начале и в конце экспозиции [23] с учетом метеопараметров с ручной метеостанции Kestrel 5000. Глубину станции измеряли судовым эхолотом. Сопутствующие измерения температуры воды и растворенного кислорода производили зондом YSI ProODO.

Одновременно были отобраны пробы воды с разных горизонтов для определения содержания метана. Из батометра Рутнера в шприц с трехходовым краном отбирали 40 мл воды и 20 мл воздуха, шприц встряхивали 2–3 мин, чтобы перевести растворенный метан в равновесие с газообразной фазой [24]. Воздух из шприца закачивали во флакон с насыщенным раствором NaCl, для учета содержания метана в воздухе отдельно отбиралась проба воздуха на каждой станции. Определение метана в пробах производили на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» производства ЗАО «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором.

Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана – Берджа и трубкой ТГ-1. Определение содержания органического вещества (ОВ) в донных отложениях (ДО) производилось методом потерь при прокаливании[2].

В качестве основного инструмента для численного моделирования эмиссии метана из Цимлянского водохранилища использована модель LAKE 3.2. Подробное описание модели приведено в публикации [15], а также на сайте[3]. В модели реализована квазидвумерная постановка численных экспериментов для воспроизведения процессов, происходящих в водохранилищах. При осреднении по горизонтали слоев водной толщи в модели дифференцированы колонки донных отложений по глубине водоема, благодаря чему воспроизводится сложная морфометрическая структура рельефа дна, характерная для долинных водохранилищ. Модель включает блок термогидродинамических уравнений, а также блок биохимических процессов, в который входят генерация метана в донных отложениях, окисление метана в водной толще, модель пузырькового потока метана и т. д.

В качестве начальных условий задавался условный начальный профиль всех характеристик, из-за чего при расчете использовался разгонный период (spin up), позволяющий водной экосистеме прийти в устойчивое состояние. Разгонный период не учитывался при анализе результатов моделирования. Входные данные в модель – информация об атмосферном форсинге (полученная по данным реанализа ERA5-Land) и информация об изменении водного режима водоема, включая динамику уровня воды. Период расчета модели: 01.01.2022 – 31.12.2024 (дополнительно 2022 г. считали дважды в качестве разгонного периода).

2 ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017.

3 Lake. Mathematical model. [Электр. ресурс]. 2021. https://mathmod.org/lake/ (дата обращения: 15.01.2026).

Процесс калибровки модели проводился с помощью методов случайного подбора параметров и эволюционных алгоритмов, реализованных на языке программирования Python – SPOTPY[4]. В ходе калибровки последовательно проводился подбор параметров термодинамического режима, кислородного режима и параметров метанового блока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные полевые измерения выявили значительную неоднородность содержания и удельного потока метана в Цимлянском водохранилище – от 0 до 1139 мгCH_4/м^{2}сут (табл. 1). Большой разброс значений обусловлен различиями характера донных отложений, глубиной станции, содержанием растворенного кислорода, стратификацией, поступлением водных масс притоков, атмосферным давлением и прочими факторами. Фотосинтез в поверхностном слое и хорошее перемешивание, способствующие аэрации воды, сокращают поток метана из донных отложений при окислении. На большинстве станций в придонном горизонте отсутствовала аноксия, что способствовало снижению потока метана на поверхности.

Наибольшие значения потока метана приурочены к верховьям водохранилища и приустьевым заливам притоков, где происходит седиментация и формирование илистых, более богатых органическим веществом донных отложений, чем пески и ракушечник обширной затопленной поймы и террасы. Для расчета эмиссии в период съемки водохранилища использованы данные батиграфических кривых для отсеков водохранилища, полученные по данным схем, приведенных в[5] [25]. Водоем был подразделен на районы согласно принятому выделению в [26], для каждого района в соответствии с формой батиграфической кривой определена площадь, занятая затопленными русловой ложбиной и пойменно-террасным комплексом. По имеющимся материалам съемок для участков определены значения удельного потока метана, измерявшегося над участками с различной глубиной. Станции назначались заранее с учетом морфологического строения затопленной долины (рис. 1). Расчеты суточной эмиссии метана с учетом дифференциации его удельного потока над затопленными руслом и поймой по районам дают оценку в 205 т CH_4 для экспедиции в 2023 г. и 32,7 т CH_4 в 2024 г. Различия связаны с погодными условиями, глубиной перемешивания и аэрацией водной толщи. Подобная межгодовая изменчивость требует либо постоянного мониторинга, либо привлечения инструментов математического моделирования, что и было реализовано в рамках представленного исследования.

4 SPOTPY. Python library. Documentation. [Электр. ресурс]. 2020. https://spotpy.readthedocs.io/en/latest/ (дата обращения 15.11.2025).

5 Уточнение морфологических характеристик Цимлянского водохранилища с целью повышения эффективного режима его эксплуатации. М.: Филиал Гидропроекта, 2005. 145 с.

Таблица 1. Средние значения удельного потока метана (УПМ) для морфологических районов за периоды съемок, мгCH_4/м^{2}сут

Table 1. Average values of methane specific flux (mgCH_4/m^{2}day) for morphological regions during the field campaigns

Район		27 сентября – 1 октября 2023 г.	7 – 10 сентября 2024 г.
х. Кривский, плотина	Станции	2–7	
	УПМ	0,0–6,4	0,0–4,4
Устье р. Аксай Курмоярский – х. Кривский	Станции	9–10	
	УПМ	0,0–0,7	НД
г. Ильмень Суворовский – устье р. Аксай Курмоярский	Станции	11–15	
	УПМ	1,1–8,1	0,0–6,7
х. Логовской – г. Ильмень Суворовский	Станции	16–18, 20	
	УПМ	3,5–12,9	39,5–135
Выше х. Логовского	Станции	22, 25	
	УПМ	41,3–689	НД
Приустьевые заливы	Станции	17, 19, 21, 23	
	УПМ	12,9–1139	4,8–736

На рис. 2 приведено сравнение интегральных профилей распределения температуры по глубине Цимлянского водохранилища по результатам модели и по данным наблюдений (данные об интегральном распределении температу-

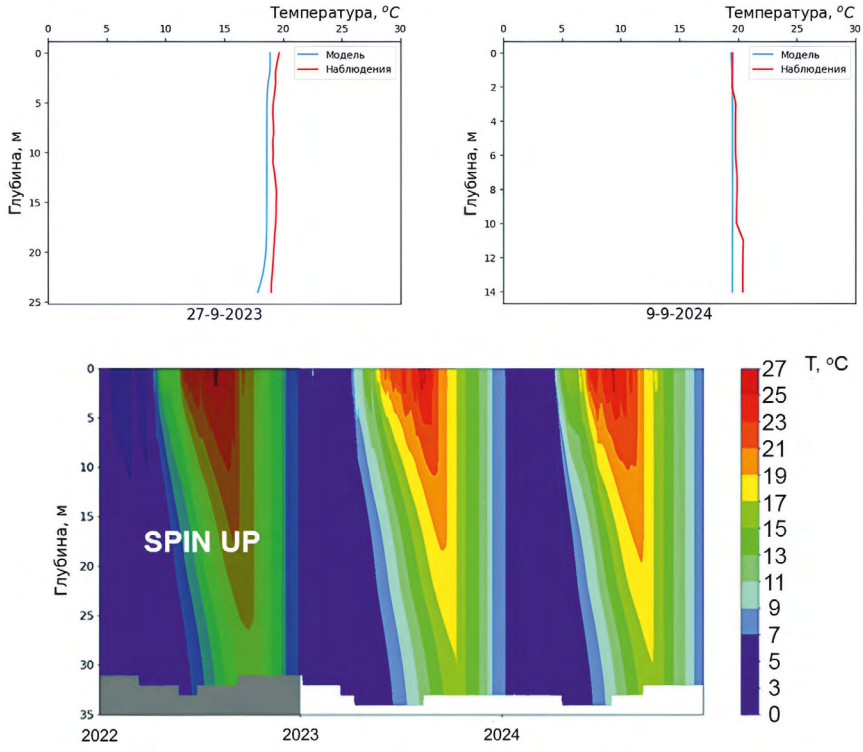


Рис. 2. Сравнение вертикальных профилей температуры по глубине Цимлянского водохранилища и временная изменчивость температуры по результатам расчета модели

Fig. 2. Comparison of vertical profiles of water temperature by depth of Tsimlyansk reservoir and temporal variability of temperature according to model calculations

ры воды по глубине получены с помощью осреднения профилей зондирования на станциях наблюдений), а также временная изменчивость температуры по глубине за период расчета.

Для Цимлянского водохранилища, как для димиктического водоема, характерны четыре фазы термического цикла, которые воспроизводятся в модели. В зимний период в поверхностных горизонтах температура воды опускается до 0 °С, образуется ледяной покров. Весной и осенью наблюдается полное перемешивание водоема, что также отражено в модельных результатах. В летний период закономерно возникает температурная стратификация, слой наибольшего температурного градиента в течение теплого периода, образовавшись в мае – июне, постепенно заглубляется, и значительная часть водоема хорошо прогревается, после чего наступает фаза осеннего конвективного перемешивания.

Обе полевые съемки на Цимлянском водохранилище проводились в сентябре: в 2023 г. в условиях сохранившейся стратификации и в 2024 г. уже в период гомотермии при охлаждении водоема. Вертикальное однородное распределение температуры с глубиной хорошо воспроизводится в модели LAKE (рис. 2).

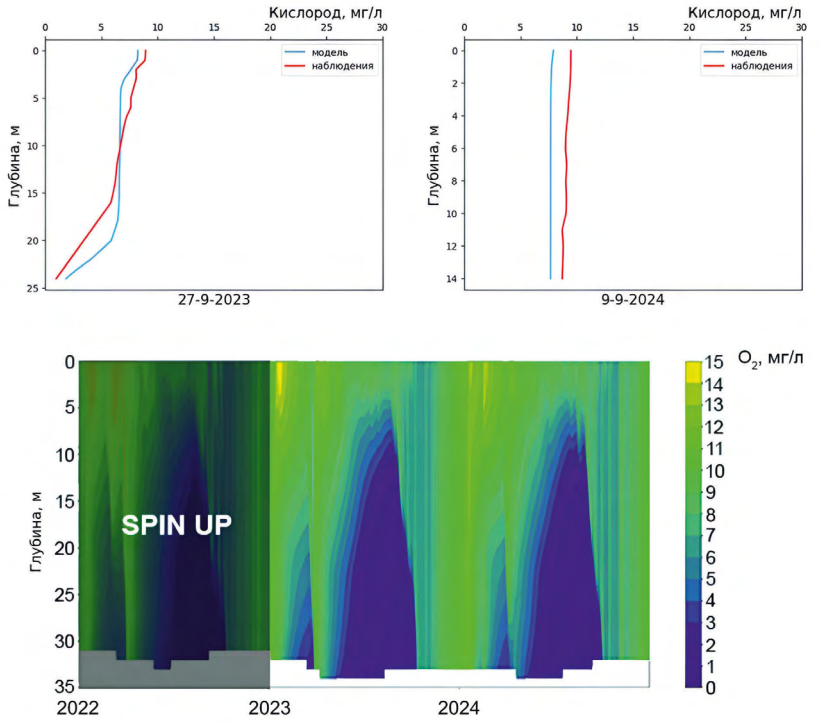


Рис. 3. Сравнение вертикальных профилей растворенного кислорода по глубине Цимлянского водохранилища и временная изменчивость содержания растворенного кислорода по результатам расчета модели

Fig. 3. Comparison of vertical profiles of dissolved oxygen by depth of Tsimlyansk reservoir and temporal variability of dissolved oxygen content according to model calculations

На рис. 3 представлено аналогичное сравнение результатов модели и данных наблюдений для растворенного кислорода, а также график его временной изменчивости с глубиной за 2022–2024 гг.

При относительно небольшой проточности [19] особенность кислородного режима Цимлянского водохранилища заключается в образовании зоны с бескислородными условиями в течение жарких периодов. При этом бескислородные условия могут продолжаться в отдельные годы и осенью, что хорошо видно по графикам совмещенных интегральных профилей распределения кислорода по глубине по результатам модели и по натурным данным в период первой полевой кампании (сентябрь 2023 г.) (рис. 3). Наступление периода, когда водная толща становится полностью насыщенной кислородом, может значительно варьировать от года к году в зависимости от предшествующих метеорологических условий. Тем не менее такие различия в кислородном режиме от года к году также адекватно описываются по результатам численных экспериментов с помощью модели LAKE. В остальную часть года содержание кислорода в водоеме достаточно высоко, максимума оно достигает в начале года, когда растворимость кислорода в воде наибольшая из-за низких температур, а биохимические процессы, на которые затрачивается кислород, в начале периода ледостава еще не сказываются на истощении его запасов.

В рамках проведенного исследования одной из задач математического моделирования эмиссии метана из Цимлянского водохранилища было изучение влияния различных комбинаций параметров модели на итоговую оценку выброса метана в атмосферу. Как уже отмечено выше, поток метана имеет очень высокую пространственно-временную изменчивость, а также высокую чувствительность к характеристикам водной среды и внешним условиям. Поэтому правильный подбор параметров при моделировании является ключевой задачей для корректной оценки эмиссии метана из водохранилища. Большое количество факторов, влияющих на удельный поток метана, приводит к необходимости использования натурных данных для калибровки численных моделей, без которой расхождение между результатами натурных наблюдений и численных экспериментов будет очень высоким.

Для того чтобы продемонстрировать необходимость использования натурных данных для моделирования эмиссии метана из водохранилищ, было проведено несколько запусков модели с разными параметрами в блоке реакций, связанных с генерацией и окислением метана. В эксперименте изменялись базовая скорость генерации метана, параметр температурной зависимости генерации, максимальная скорость окисления, параметры метановых пузырьков и т. д.

Первый эксперимент проведен со значениями параметров модели, являющимися значениями по умолчанию, т. е. эти значения в модели предустановлены до процесса калибровки. Во втором случае использовались значения па-

раметров, полученные в ходе исследования авторами динамики удельного потока метана на Иваньковском водохранилище, которое также характеризуется значительным «цветением» воды, но имеет более проточный режим (результаты моделирования эмиссии метана из Иваньковского водохранилища подробно описаны в [27]). И в третьем эксперименте была выполнена собственная калибровка параметров для реакций метанового блока для Цимлянского водохранилища по двум описанным выше полевым кампаниям. Результаты временной изменчивости потоков по описанным трем экспериментам представлены на рис. 4.

Значения параметров модели, которые заданы в ней по умолчанию, получены в основном в результате лабораторных экспериментов в ходе изучения микробиологических сообществ архей метаногенов или метанотрофных организмов (например, подобные исследования представлены в [28–30]). Эти значения являются осредненными из большого количества исследований, в т. ч. и при очень высоких температурах, не характерных для природных водоемов (до 40 °С) [30], а также для озер тропического пояса, где метаногенера-

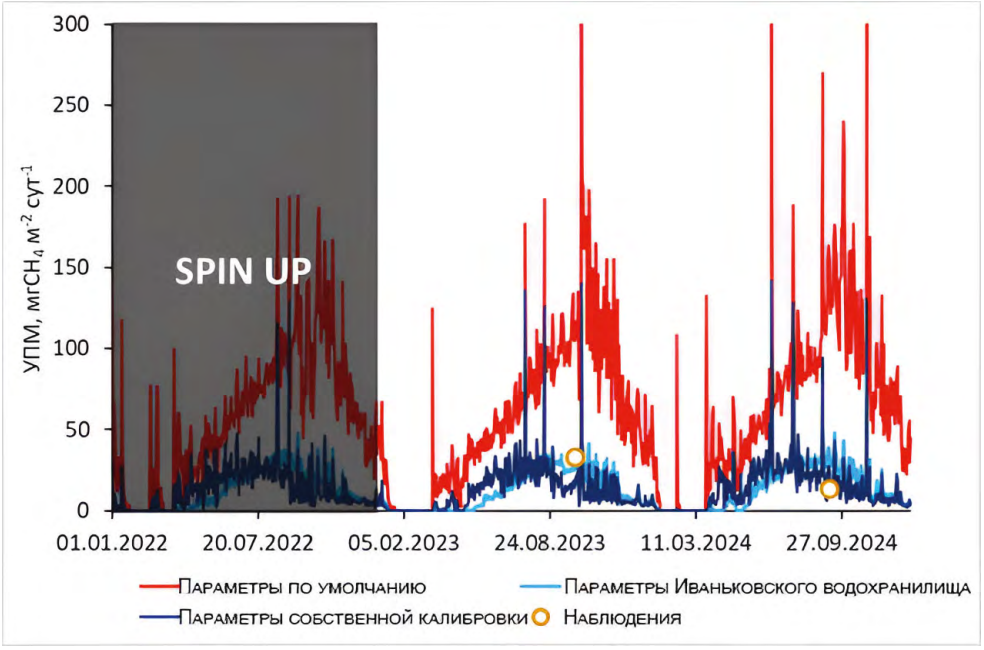


Рис. 4. Временная изменчивость удельного потока метана (УПМ) из Цимлянского водохранилища по результатам трех численных экспериментов с различными значениями входных параметров: значения по умолчанию; значения, аналогичные полученным для Иваньковского водохранилища; калибровка по натурным данным, полученным на Цимлянском водохранилище

Fig. 4. Temporal variability of methane specific flux (MSF) from Tsimlyansk reservoir according to numerical experiments with various sets of input parameters: default values; values, similar to calibrated values for Ivankovo reservoir; calibrated parameters according to field measurements data, obtained on Tsimlyansk reservoir

ция намного значительнее, чем в пресноводных водоемах умеренных широт. Поэтому не удивительно, что при применении к Цимлянскому водохранилищу подобных средних значений параметров результаты оценки эмиссии метана будут завышены.

Как следует из рис. 4, значения параметров модели «по умолчанию» приводят к завышенной оценке эмиссии метана из Цимлянского водохранилища. Более близкий к измерениям результат дает использование значений параметров, полученных для водоема-аналога. Разумеется, Иваньковское водохранилище отличается от Цимлянского проточностью и климатическими условиями, хотя оба расположены в умеренно-континентальном климате, однако при использовании параметров водоема-аналога результаты моделирования гораздо ближе к измеренным натурным данным и, более того, они близки к третьему эксперименту, где значения параметров для Цимлянского водохранилища калибровались отдельно. Ниже в табл. 2 приведены значения метрик ошибок, используемых для сравнения качества результатов описанных выше трех экспериментов.

При калибровке по натурным данным измеренных значений уровней потока метана из Цимлянского водохранилища удалось достичь минимальной относительной ошибки средних значений между моделью и данными наблюдений – 2 %. Значение метрики RSR, используемой для оценки качества математических моделей [31], также меньше 1 только для калибровки по натурным данным, в остальных случаях собственная изменчивость наблюдаемой величины меньше, чем ошибка модели, что свидетельствует о низкой надежности расчета.

Таблица 2. Оценка качества воспроизведения моделью значений удельного потока метана из Цимлянского водохранилища по результатам численных экспериментов

Table 2. Evaluation of the quality of the model's reproduction of methane specific fluxes values from the Tsimlyansk reservoir based on the results of the numerical experiments described above

Эксперимент	Относительная ошибка среднего значения	Относительная абсолютная ошибка	Отношение среднеквадратической ошибки к стандартному отклонению
	$\varepsilon[\%] = \left\lvert\frac{(\overline{MOD} - \overline{OBS})}{\overline{OBS}}\right\rvert$	$rMAE = \frac{1}{n}\left\lvert\sum_{i=1}^{n} OBS_i - MOD_i\right\rvert$	$RSR = \frac{RMSE}{\text{СКО}}$
Значения параметров по умолчанию	480 %	114	8,60
Значения параметров, аналогичные Иваньковскому водохранилищу	40 %	14,4	1,26
Значения параметров после калибровки по натурным данным	2 %	12,3	0,90

Исходя из полученных результатов, авторы не рекомендуют использовать базовые значения параметров биохимических процессов модели LAKE при гидроэкологическом моделировании для оценок годовой эмиссии метана. При наличии водоемов-аналогов допускается использование полученных при их моделировании значений необходимых параметров, однако наилучший результат возможен при использовании натурных данных измерений удельного потока метана в качестве материалов для калибровки.

Из табл. 2 видно, что даже для калибровки по натурным данным измерений удельного потока метана из Цимлянского водохранилища величина абсолютной ошибки модели остается достаточно высокой, что в первую очередь может быть связано с небольшим количеством данных наблюдений. Кроме того, используемые в численных экспериментах данные относятся только к одному периоду года – осенней гомотермии. Для наиболее корректных результатов моделирования необходимо учитывать измерения в летний период при наиболее устойчивой стратификации водной толщи и при наиболее высоких значениях УПМ, а самые точные результаты могут быть получены при калибровке модели по данным измерений за несколько лет в разные периоды года.

Что же касается оценки годовой эмиссии метана из Цимлянского водохранилища, она была получена по результатам модели как произведение УПМ за каждые сутки на площадь водоема за период с 2023 по 2024 г. (2022 г. являлся в модели разгонным периодом). Величина годовой эмиссии составила 12,4 тыс. т CH_4 за 2023 г. и 13,8 тыс. т CH_4 за 2024 г.

Дополнительно по результатам численных экспериментов для набора параметров модели после проведения калибровки по натурным данным проведена оценка вклада в общую величину эмиссии в атмосферу разных составляющих удельного потока метана. К основным составляющим потока метана относятся: диффузионный поток метана, пузырьковый поток и дегазация метана при сбросе воды в нижний бьеф ГЭС. Диффузионный поток, как правило, имеет небольшие величины из-за окисления метана в толще воды при подъеме от дна к поверхности. Его величина зависит в первую очередь от разницы концентрации метана в воде и в воздухе и от ряда метеоусловий. Пузырьковый поток появляется при пересыщении воды метаном, что в искусственных водоемах часто возникает из-за активной метаногенерации в грунтах. Пузырьки метана достигают поверхности воды достаточно быстро и не подвержены окислению, однако могут растворяться в водной толще в процессе подъема. Дегазация метана возникает при сбросах воды в нижний бьеф гидроузла и зависит от расхода воды и концентрации метана в верхнем и нижнем бьефах. На рис. 5 приведен график временной изменчивости основных составляющих потока метана в атмосферу по результатам модельных расчетов.

На примере 2023 и 2024 гг. отчетливо видно, что основной вклад в эмиссию метана в атмосферу вносит пузырьковая составляющая удельного потока.

Такая особенность не является уникальной для Цимлянского водохранилища, схожие результаты были получены по данным измерений или модельных экспериментов для Можайского, Иваньковского, Волгоградского водохранилищ [15, 17, 32].

Превышение пузырькового потока над диффузионным характерно для практически всего теплого периода года. Наиболее значительные пузырьковые УПМ наблюдаются в середине лета – в июле и августе. Это происходит по нескольким причинам. Во-первых, при устойчивой летней стратификации в придонных горизонтах устанавливаются бескислородные условия, что позволяет содержанию растворенного метана приближаться к критической концентрации, при превышении которой начинается образование пузырьков. Во-вторых, из-за жаркой погоды в поверхностных горизонтах воды, благодаря активному фотосинтезу, содержание кислорода очень велико, что в значительной степени ингибирует диффузионный поток.

В начале и середине осени, наоборот, наблюдается превышение и наибольшие в течение всего года значения диффузионного потока метана. В этот период метаногенерация ослабевает из-за снижения температуры, водная толща насыщается кислородом, поэтому метан не накапливается в придонной воде. Однако этот период гомотермии сопровождается активным конвективным перемешиванием воды, что приводит к тому, что насыщенные за лето метаном придонные воды поднимаются к поверхности и происходит усиление диффузионного переноса метана в атмосферу. Что же касается дегазации метана в нижнем бьефе Цимлянской ГЭС, ее величина не сопоставима с величиной эмис-

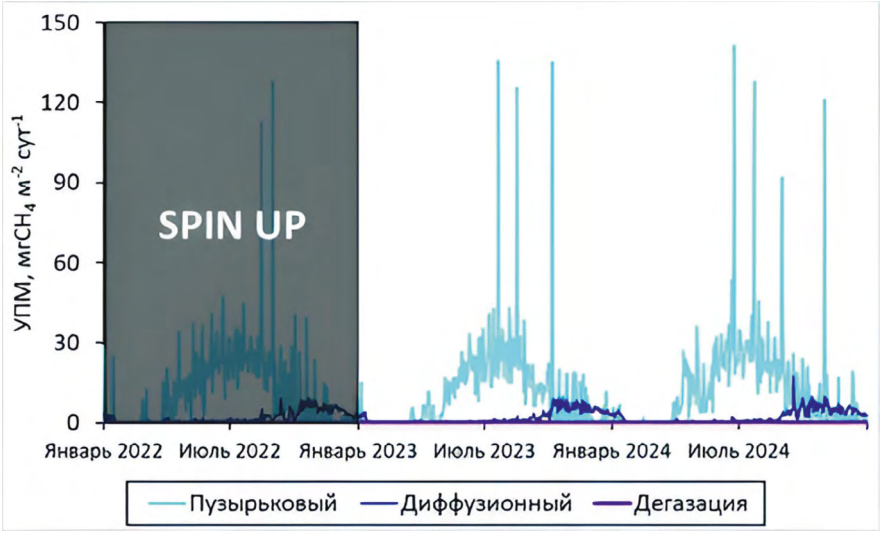


Рис. 5. Временная изменчивость пузырьковой и диффузионной составляющих УПМ, а также дегазации метана из Цимлянского водохранилища

Fig. 5. Temporal variability of the ebullition and diffusion components of the methane specific flux, as well as methane degassing from the Tsimlyansk reservoir

сии метана с поверхности водохранилища. Средние значения суточной дегазации метана при сбросах воды в нижний бьеф из Цимлянского водохранилища составляет около 60–70 кг CH_4 в сутки. В общей доле эмиссии метана вклад пузырькового потока составляет около 85 %, диффузионного – около 15 %, дегазации – менее одного процента.

Для сравнения проведена оценка годовой эмиссии метана с Цимлянского водохранилища по данным полевых кампаний без привлечения моделирования. При расчете годовой эмиссии за время ледостава принят период декабрь – март [32] с нулевым УПМ. Для весеннего и осеннего периодов – осредненные по районам (табл. 1) значения, полученные в период съемки в сентябре 2024 г., когда вода в водохранилище была полностью перемешана, для летнего периода – значения по съемке в сентябре 2023 г., когда сохранялась стратификация. При данных допущениях общий выход метана составил 17,2 тыс. т в год, что достаточно хорошо соответствует полученным выше модельным оценкам.

ВЫВОДЫ

На примере Цимлянского водохранилища авторами продемонстрирована методика оценки эмиссии метана с привлечением комплексного подхода, включающего данные натурных наблюдений и математического моделирования. Модель показала адекватную степень воспроизведения температурного и кислородного режимов, а также адекватную сходимость временного хода удельного потока метана и натурных данных, полученных in situ. На примере Цимлянского водохранилища показано, что для корректных модельных оценок такого рода необходимы данные натурных наблюдений, в качестве значений параметров модели возможно использование параметров для водоемов- аналогов, однако такие оценки будут нести в себе большую ошибку, чем моделирование с полноценной калибровкой по данным натурных измерений, проведенных на водохранилище.

Для грубой оценки годовой эмиссии метана по натурным данным необходимо иметь сведения о пространственном распределении удельного потока метана при наличии и при отсутствии стратификации в водоеме, принимая его выход в период ледостава равным нулю. Большая пространственная изменчивость удельного потока метана, обусловленная асимметричным продольным профилем, различием донных отложений на поперечных разрезах, ставит задачу проведения измерений на сетке станций в соответствии с морфометрическим строением водоема.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении решающей роли локальных параметров донных отложений и глубины в формировании пространственной неоднородности удельного потока метана, а также в обосновании необходимости локальной калибровки даже для водоемов одного

климатического пояса. В рамках проведенной работы практически апробирована методика, которая может быть использована для инвентаризации парниковых газов на водохранилищах с ограниченным объемом полевых данных.

Полученные оценки эмиссии (12,4–13,8 тыс. т CH_4 в год) важны для уточнения регионального углеродного баланса и экологической оценки вклада гидроэнергетики в выбросы парниковых газов в южном регионе России. Перспективы дальнейших исследований включают анализ климатической изменчивости эмиссии, а также адаптацию методики для прогнозных расчетов при проектировании новых ГЭС и при различных сценариях изменения климата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» за помощь в проведении полевых работ.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank colleagues from the carbon polygon «Tsimlyansk reservoir» for their help in carrying out field work.

Описание применения генеративной модели: при проведении исследования и для подготовки текста статьи не использованы программы на основе искусственного интеллекта.

Description of a generative model application: No artificial intelligence-based programs were used during the research and for writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. Vol. 444. P. 524–525. https://doi.org/10.1038/444524a
2. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // Mitigation Adaptation Strategy Global Change. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5
3. Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. https://doi.org/10.1029/2021JG006305
4. *Гречушникова М. Г., Кравчук М. В.* Сравнение результатов натурных измерений эмиссии метана с разнотипных водохранилищ РФ с данными Global maps of methane emissions // Всерос. конф., посвященная памяти академика А. М. Обухова, «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». М.: Физматкнига, 2022. С. 118–118.
5. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С. Параметризация удельного потока метана с акватории водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды IX Всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 25–28 мая 2023 г.). Пермь: ПГНИУ. 2023. Т. 1. С. 237–241.

6. Bazhin N. Methane Emission from Bottom Sediments // Chemistry for Sustainable Development. 2003. Vol. 11. P. 577–580.
7. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J., Koszelnik P., Czerwieniec, E. Methane and carbon dioxide emission from some reservoirs in SE Poland // Limnol. Review. 2010. Vol. 10 (1). P. 15–21. https://doi.org/10.2478/v10194-011-0002-8
8. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH4 emissions // Journal of Geophyscal Research. 2008. Vol. 113. P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2007JG000608
9. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. P. 3006–3020. https://doi.org/10.1029/2006JG000393
10. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // Environmental Management. 2017. Vol. 60 (4). P. 615–629. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Environmental Science & Technology. 2017. Vol. 51 (3) P. 1267–1277. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185
12. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH4 and CO2 from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // Inland Waters. 2016. Vol. 6. P. 1–8. https://doi.org/10.5268/IW-6.3.980
13. Казанцев В. С., Кривенок Л. А., Гречушникова М. Г. и др. Оценка эмиссии метана из Можайского водохранилища в весенний период // Метеорология и гидрология. 2026. № 3. С. 123–133. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2026-3-123-133
14. Репина И. А., Гречушникова М. Г., Фролова Н. Л., Агафонова С. А. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060080
15. Lomov V. A., Stepanenko V. M., Grechushnikova M. G., Repina I. A. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir // MDPI Water. 2024. Vol. 16. No. 1. 76. https://doi.org/10.3390/w16010076
16. Fenocchi A., Rogora M., Ciampittiello M., Dresti C., Hipsey M. R. Applicability of a one-dimensional coupled ecological-hydrodynamic numerical model to future projections in a very deep large lake (Lake Maggiore, Northern Italy/Southern Switzerland) // Ecological Modelling. 2019. Vol. 392. No. 1. P. 38–51. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.015
17. Tsvetnov E. V., Tyshova E. A., Lomov V. A., Kazantsev V. S., Sokolov D. I., Efimov V. A. Assessment of Methane Emissions from the Surface of the Volgograd Reservoir and the Associated Impact on the Environment // Water Resources. 2024. Vol. 51. No. (suppl. 1). P. S347–S355. https://doi.org/10.1134/S0097807824701513
18. Фролова Н. Л., Сазонов А. А., Ломов В. А. Эмиссия метана из Колымского водохранилища: данные наблюдений и результаты численных экспериментов // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2025. Т. 80. № 6. С. 18–32. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.2
19. Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения // М: ГЕОС. 1998. 277 с.
20. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С., Усова Е. В. 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. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища // под ред. В. А. Знаменского и В. М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 291 с.
22. Лобойко В. Ф., Зубов И. А. Роль факторов среды и антропогенного воздействия в формировании современной экосистемы Цимлянского водохранилища // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2009. № 2 (14). С. 26–32.
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L., et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biochemical Cycles. 2004. Vol. 18. https://doi.org/10.1029/2004GB00223
24. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science and Technology. 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
25. Панин Г. Н. и др. Особенности гидрологического режима Цимлянского водохранилища при климатических изменениях в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 111–121.
26. Гречушникова М. Г., Пуклакова Н. Г., Эдельштейн К. К. Возможное изменение гидрологического режима Цимлянского водохранилища при потеплении климата // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. № 4. С. 17–25.
27. Ломов В. А. Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ (по данным измерений и математической модели): автореф. дис… канд. геогр. наук. М., 2024. 209 с.
28. Liikanen A., Huttunen J. T., Valli K., Martikainen P. J. Methane cycling in the sediment and water column of mid-boreal hyper-eutrophic Lake Kevaton // Finland: Archiv fur Hydrobiologie. 2002. Vol. 154 (4). P. 585–603. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/585
29. Schulz S., Matsuyama H., Conrad R. Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance) // FEMS Microbiology Ecology. 1997. Vol. 22. No. 3. P. 207–213. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00372.x
30. Striegl R. G., Michmerhuizen C. M, Survey U. S. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43 (7). P. 1519–1529. https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1519
31. Moriasi D., Arnold J., Liew V., Bingner R. et. al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2007. Vol. 50 (3). P. 885−900. https://doi.org/10.13031/2013.23153
32. Гречушникова М. Г., Григорьева И. Л., Ломова Д. В., Кременецкая Е. Р. и др. Формирование гидроэкологической структуры Иваньковского водохранилища в летний период в смежные годы с различными погодными условиями // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 3. С. 98–113. https://doi.org/10.31857/S0002351524030093

REFERENCES

1. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. https://doi.org/10.1038/444524a
2. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5
3. Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. https://doi.org/10.1029/2021JG006305

4. Grechushnikova M. G., Kravchuk M. V. Comparison of the results of field measurements of methane emissions from various reservoirs of the Russian Federation with data from Global maps of methane emissions. All-Russian conference dedicated to the memory of Academician A. M. Obukhov "Turbulence, dynamics of atmosphere and climate". Moscow: Fizmatkniga, 2022. P. 118–118.
5. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S. Parametrization of the specific methane flux from the water area of reservoirs // Modern problems of reservoirs and their catchments: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International participant. (Perm, May 25-28, 2023). Perm: PSNIU 2023. Vol. 1. P. 237–241.
6. Bazhin N. Methane Emission from Bottom Sediments. *Chemistry for Sustainable Development.* 2003. Vol. 11. P. 577–580.
7. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J., Koszelnik P., Czerwieniec, E. Methane and carbon dioxide emission from some reservoirs in SE Poland. *Limnol. Review.* 2010. Vol. 10 (1). P. 15–21. https://doi.org/10.2478/v10194-011-0002-8
8. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH4 emissions. *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2007JG000608
9. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research.* 2007. Vol. 112. P. 3006– 3020. https://doi.org/10.1029/2006JG000393
10. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Management*. 2017. Vol. 60 (4). P. 615–629. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51 (3). P. 1267–1277. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185
12. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH4 and CO2 from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Waters*. 2016. Vol. 6. P. 1–8. https://doi.org/10.5268/IW-6.3.980
13. Kazantsev V. S., Krivenok L. A., Grechushnikova M. G. et al. Assessment of methane emission from Mozhaysk reservoir in spring period. *Meteorology and hydrology.* 2026. No. 3. P. 123–133. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2026-3-123-133
14. Repina I. A., Grechushnikova M. G., Frolova N. L., Agafonova S. A. et al. Methane content and fluxes in the Volga reservoirs. *Newsletters of the Russian Academy of Sciences*. Series: Geography. 2023. Vol. 87. No. 6. P. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060080
15. Lomov V. A., Stepanenko V. M., Grechushnikova M. G., Repina I. A. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir. *MDPI Water*. 2024. Vol. 16. No. 1. 76. https://doi.org/10.3390/w16010076
16. Fenocchi A., Rogora M., Ciampittiello M., Dresti C., Hipsey M. R. Applicability of a one-dimensional coupled ecological-hydrodynamic numerical model to future projections in a very deep large lake (Lake Maggiore, Northern Italy/Southern Switzerland). *Ecological Modelling.* 2019. Vol. 392. No. 1. P. 38–51. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.015
17. Tsvetnov E. V., Tyshova E. A., Lomov V. A., Kazantsev V. S., Sokolov D. I., Efimov V. A. Assessment of Methane Emissions from the Surface of the Volgograd Reservoir and the Associated Impact on the Environment. *Water Resources*. 2024. Vol. 51. No. (suppl. 1). P. S347–S355. https://doi.org/10.1134/S0097807824701513
18. Frolova N. L., Sazonov A. A., Lomov V. A. Methane Emission from the Kolyma Reservoir: Observation Data and Results of Numerical Experiments. *Moscow University Bulletin*. Series 5. Geography. 2025. Vol. 80. No. 6. P. 18–32. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.2

19. Edelstein K. K. Reservoirs of Russia: environmental problems and ways to solve them. Moscow: GEOS. 1998. 277 p.
20. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S., Usova E. V. et al. The first results of studying the spatial and temporal variability of methane content and emissions in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
21. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsimlyansk, watershed and Manych reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 291 p.
22. Loboiko V. F., Zubov I. A. The role of environmental factors and anthropogenic impact in the formation of the modern ecosystem of the Tsimlyansk reservoir. *Newsletters of Nizhnevolzhsk Agrarian University*, 2009. No. 2 (14). P. 26–32.
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biochemical Cycles*. 2004. No. 18. https://doi.org/10.1029/2004GB00223
24. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science and Technology*. 2010. 44(14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
25. Panin G. N. et al. Features of the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir during climatic changes in the Don basin. *Water Resources*. 2016. Vol. 43. No. 2. P. 111–121.
26. Grechushnikova M. G., Puklakova N. G., Edelstein K. K. Possible changes in the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir during climate warming. *Newsletters of MSU*. Ser. 5. Geography. No. 4. P. 17–25.
27. Lomov V. A. Methane emissions from reservoirs of various types (according to measurement data and mathematical model) [Text]: abstract thesis for. Ph. D. Geographical Sciences: 1.6.16: protected on 12/19/2024, approved on 04/23/2025. M. 2024. 209 p.
28. Liikanen A., Huttunen J.T., Valli K., Martikainen P. J. Methane cycling in the sediment and water column of mid-boreal hyper-eutrophic Lake Kevaton. *Finland: Archiv fur Hydrobiologie*. 2002. Vol. 154 (4). P. 585–603. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/585
29. Schulz S., Matsuyama H., Conrad R. Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance). *FEMS Microbiology Ecology*. 1997. Vol. 22, no. 3. P. 207–213. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00372.x
30. Striegl R. G., Michmerhuizen C. M, Survey U. S. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes. *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43 (7). P. 1519–1529. https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1519
31. Moriasi D., Arnold J., Liew V., Bingner R., et. al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2007. Vol. 50(3). P. 885−900. https://doi.org/10.13031/2013.23153
32. Grechushnikova M. G., Grigorieva I. L., Lomova D. V., Kremenetskaya E. R. *et al*. Formation of the hydroecological structure of the Ivankovo reservoir in the summer period in adjacent years with different weather conditions. *Newsletters of RAS*. Physics of the atmosphere and ocean. 2024. Vol. 60. No. 3. P. 98–113. https://doi.org/10.31857/S0002351524030093

Сведения об авторах:

Ломов Виктор Александрович, канд. геогр. наук, младший научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.; https://orcid.org/0000-0001-5275-390X; e-mail: lomson620@mail.ru

Гречушникова Мария Георгиевна, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.; https://orcid.org/0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

About the authors:

Victor A. Lomov, Ph.D., Junior Researcher, Hydrology Department, Faculty of Geography, Lomonosov MSU, 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1; https://orcid.org/0000-0001-5275-390X; e-mail: lomson620@mail.ru

Maria G. Grechushnikova, Ph.D., Leading Researcher, Hydrology Department, Faculty of Geography, Lomonosov MSU, 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1; https://orcid.org/0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 27.02.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 23.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 11.05.2026.