

Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища)

Ю.А. Федоров^{1,2}  , Д.Н. Гарькуша^{1,2} , А.Е. Косолапов² 
Е.В. Усова² , Е.А. Анпилова² , М.А. Верещагин² , А.И. Беляев³ 

 fedorov@sfedu.ru

¹ Институт наук о Земле Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону, Россия

² Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия

³ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и
защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проанализированы и обобщены обширные оригинальные данные и опубликованные материалы, касающиеся вопросов изучения формирования выбросов и поглощения CH_4 в искусственных и естественных водных объектах. **Результаты.** На основе проведенного анализа предложен подробный план экспедиционных и экспериментальных работ, направленных на установление вклада ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков и стоков CH_4 и его баланс, а также оценку суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища – как наиболее крупного пресного водоема в степной зоне европейской части России. Показано, что для каждого водного объекта характерен набор специфических условий и показателей, которые контролируют распределение в воде и донных отложениях содержания метана и его эмиссию в атмосферу. Установлено, что большая вариативность концентраций и удельных потоков метана в водохранилищах связана с изменчивостью гидрологических и морфологических особенностей, обуславливающих интенсивность продукционно-деструкционных процессов, характером механической миграции органического и минерального вещества и распределением литологических типов донных отложений на разных участках водоема. Значительное воздействие оказывают также ветровая активность и поступление соединений углерода, азота и фосфора с поверхности водосбора и в результате разложения органического вещества почв и растительности, затопленных при наполнении водохранилища. Результаты комплексных натурных наблюдений на Цимлянском водохранилище планируется использовать при разработке и апробации методики и методологии оценки эмиссии метана с поверхности крупных водохранилищ и озер степной зоны юга России.



КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метан, диоксид углерода, органическое вещество, выбросы, водохранилище, мониторинг, эмиссия климатически активных газов.


Для цитирования: Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.А., Верещагин М.А., Беляев А.И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–72. DOI:10.35567/19994508-2024-3-68-72.

Дата поступления 16.05. 2024.

© Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.А., Верещагин М.А., Беляев А.И., 2024

ARTIFICIAL WATER BODIES AS METHANE GENESIS HOTBEDS (THE TSIMLYANSK RESERVOIR AS AN EXAMPLE)

Yuriy A. Fedorov^{1,2}  , Dmitry N. Garkusha^{1,2} , Aleksey E. Kosolapov² ,
Elena V. Usova² , Evgenia L. Anpilova² , Mikhail A. Vereshchagin² ,
Aleksandr I. Belyaev³ .

 fedorov@sfedu.ru

¹ *Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-na-Donu, Russia*

² *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-na-Donu, Russia*

³ *Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land-reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia*

ABSTRACT

Relevance. We have analyzed and summarized comprehensive original data and published materials dealing with issues of investigation of CH₄ discharges and absorption in artificial and natural water bodies. **Results.** We suggested a detailed plan of expeditions and experiments based on the conducted analysis and aimed at determination of the key factors contribution in formation of the CH₄ specific flows and discharges and its balance, as well as estimation of the CH₄ total annual emission from the Tsimlyansk reservoir, the largest fresh water body in the European Russia steppe zone. It has been demonstrated that a set of special conditions and indicators that control the methane content distribution in water and bottom sediments, as well as its emission into the atmosphere is typical for every water body. We have stated that greater methane concentrations and specific flows variability is connected with the variability of hydrological and morphological specific features that cause intensity of the production-destruction processes, and determine the organic and mineral matter mechanic migration character and distribution of the bottom sediments lithological types at the water body different ranges. The results of integrated field observations at the Tsimlyansk reservoir are planned to be used in development and testing of the methods and methodology of estimation of the methane emission from the surface of major reservoirs and lakes of the South Russia steppe zone.

Keywords: methane, carbon dioxide, organic substance, выбросы, water reservoir, monitoring, climate-active gases emission.

For citation: Fedorov Y.A., Garkusha D.N., Kosolapov A.E., Usova E.V., Anpilova E.L., Vereshchagin M.A., Belayev A.I. 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. DOI:10.35567/19994508-2024-3-68-72.

Received 16.05. 2024.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время последствия парникового эффекта, негативные воздействия которого на Землю возрастают, вызывают серьезную озабоченность мирового сообщества. Основная роль в парниковом эффекте отводится атмосферным парниковым газам: углекислый газ, метан, фреоны и др., влияющим на температуру атмосферы нашей планеты. Диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄) являются двумя наиболее важными парниковыми газами. Недавний мониторинг, проведенный Всемирной метеорологической

организацией, показывает, что концентрации CH_4 и CO_2 в глобальной атмосфере достигли 1869 ± 2 частей на миллиард и $408,0 \pm 0,1$ частей на миллион. Наблюдается их устойчивый рост на 259 % и 147 % соответственно со времен промышленной революции [1].

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации¹ Правительству РФ в целях реализации Парижского соглашения от 12 декабря 2015 г. поручено «... обеспечить к 2030 году сокращение выбросов парниковых газов до 70 процентов относительно уровня 1990 года...». Необходимо достигнуть поставленной цели при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития России. Во исполнение Указа Президента была разработана Стратегия развития РФ². Одним из важных показателей реализации Стратегии является достижение объемов выбросов и поглощений парниковых газов.

Основными источниками поступления метана в атмосферу (порядка 60 % общей эмиссии) являются водоемы (болота, озера, водохранилища и т. д.), крупный рогатый скот и рисовые участки полей [1– 3]. По образному выражению [4], водохранилища – это часть глобальной «сети пресной воды», в результате эксплуатации которых в атмосферу возвращается в виде CH_4 и CO_2 «часть земного углерода».

Целью статьи является исследование состояния проблемы изучения образования и распределения содержаний и потоков органического вещества (ОВ) и CO_2 в водохранилищах и их водосборном бассейне для понимания того, как в процессе их эксплуатации создаются условия для формирования выбросов CH_4 . Это станет первым шагом, направленным на разработку комплекса сочтанных количественных балансовых моделей потоков ОВ, CO_2 и CH_4 как основы для прогнозирования и выработки предложений по сокращению выбросов метана на примере Цимлянского водохранилища.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Водоохранилища являются источниками водоснабжения и орошения, объектами энергетики и судоходства, рыбного хозяйства. В то же время, образование и эксплуатация водохранилищ могут вызывать немало экологических проблем: изъятие из оборота земель сельскохозяйственного назначения, изменение гидролого-гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод на водосборных бассейнах, изменение климата на прилегающих территориях. Водоохранилища, являясь резервуарами-накопителями (пулами) аллохтонного и автохтонного органического вещества (ОВ), трансформируя его, становятся сосредоточенными источниками эмиссии парниковых газов.

В литературе представлено неоднозначное толкование некоторых терминов, поэтому остановимся на их кратком обзоре. Так, термины «выбросы» и

¹ Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов».

² Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 29 октября 2021 года № 3052-р «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».

«поглощение» парниковых газов используются, соответственно, как синонимы «эмиссии, выделения» и «стока». С физической точки зрения, это не совсем верно. Укоренившееся в западной и затем в российской литературе понятие «выбросы» парниковых газов подразумевает их суммарную эмиссию путем диффузии и конвективного переноса в воде (пузырьковый транспорт), а также выделение через паренхиму водных растений. В отдельных работах рассматривается «эмиссионный» поток парниковых газов как результат «диффузии» и конвективного переноса. При этом сделан вывод, что обычно пузырьковый транспорт превалирует над диффузией [5, 6] газов в воде, поэтому вполне правомерно его суммарный эмиссионный поток называть «выбросом».

Ниже остановимся на анализе фундаментальных достижений, полученных при изучении формирования концентраций и потоков метана в естественных и искусственных водных объектах, которые могут быть кратко сформулированы следующим образом.

Затопление и последующая деградация наземного ОВ происходит в течение первого десятилетия существования водоема [7, 8]. Приходная часть баланса органического вещества водной толщи и донных осадков определяется, главным образом, внутриводоемными процессами (жизнедеятельность растений и животных организмов), в то время как аллохтонная составляющая играет подчиненную роль [9, 10].

Усиление притока с внешнего контура водоемов ОВ антропогенного происхождения, которое преимущественно представлено «лабильным» органическим веществом, активизирует процессы образования восстановленных газов, что было показано в работах [2, 11], в т. ч. и на примере Цимлянского водохранилища. В результате «атаки» бактерий метаногенов на субстраты биодеструкции ОВ (CO_2 , H_2 и др.) образуется метан. Это происходит на так называемой «метаногенной стадии». Работа этих бактерий начинается только тогда, когда вследствие разрушения органического вещества микроорганизмами предыдущих стадий появляются следующие субстраты: водород, диоксид углерода, закись углерода, формиат, ацетат, метанол и метилированные амины [2, 12, 13]. Показано [14], что бактерии метаногены конкурируют за обладание питательных субстратов с бактериями сульфатредукторами. Процессы сульфатредукции и метаногенеза могут идти как симбатно, так и создавать друг другу конкуренцию. Согласно термодинамическим расчетам, в борьбе за молекулярный водород выигрывают сульфатредуцирующие бактерии, что вызывает некоторое подавление скорости метаногенеза.

Существование тесной прямолинейной связи между содержанием в донных отложениях метана и ОВ является фактом, доказанным авторами монографии как напрямую [15], так и косвенно по приуроченности максимальных содержаний метана к местам свала антропогенного ОВ [2].

Биогенные компоненты, не являясь загрязняющими веществами, могут вызывать вспышки появления синезеленых и других водорослей. Образующийся при фотосинтезе водорослями кислород ингибирует метаногенез, способствуя окислению метана [16]. Но после отмирания водорослей они способны вызы-

вать усиление эвтрофирования водохранилища, которое обусловлено биодegradацией водорослей с образованием легкоокисляемого органического вещества. Попав в донные отложения, фрагменты легкоокисляемого ОВ продолжают биодеградировать под воздействием аэробных и анаэробных бактерий с образованием эмиссионных потоков диоксида углерода, сероводорода, метана и др. [2].

Содержание кислорода в водной толще, и особенно в придонном слое воды, определяет направление процессов распада органических веществ в поверхностном слое донных отложений, оказывает большое влияние на скорость образования метана и его концентрацию. В неглубоких водных объектах донные отложения являются доминирующим источником CH_4 в водной толще, поступая в которую он, частично растворяясь и окисляясь, мигрирует далее в атмосферу [2].

Процессы, происходящие на водосборе, могут изменить гидрологическую, гидробиологическую и гидрохимическую обстановку в чаше водохранилища, и таким образом оказаться триггером изменения приходных и расходных статей баланса метана. Регулируемый сброс воды через нижний бьеф вызывает существенные колебания уровня воды в водохранилище. При снижении уровня наблюдается оголение и осушка мелководных районов водохранилища (заливы, бухты). При этом в первое время после осушки происходит усиление эмиссии метана в атмосферу, а затем его поток снижается. Подобное явление наблюдалось авторами [17] в широко известных грязях месторождения Ханского озера, в котором после потери гидравлической связи с питающими его морскими водами началось высыхание грязей, снижение в них содержания CH_4 и сульфидов и, в конечном итоге, деградация пелоидов и уменьшение эмиссии метана.

Исследователи [16], обсуждая выполненный ими «Взаимосвязанный проект «Река–озеро», пришли к мнению, что он способствовал снижению выбросов CO_2 и CH_4 городских рек. Корреляционный анализ показал, что сезонные колебания CO_2 и CH_4 выбросов контролировались содержанием кислорода и температурой. Следовательно, самые высокие выбросы CO_2 наблюдались весной и самые низкие – зимой: CO_2 выбросы весной были в 10,7 раза выше, чем зимой. Наиболее высокие выбросы CH_4 отмечены летом и самые низкие зимой. CH_4 выбросы летом были в 6,6 раза выше, чем зимой. Это исследование подтвердило реальность ранее полученных нами регрессионных уравнений, демонстрирующих положительную связь между температурой воды, с одной стороны, и концентрацией метана и его потоками, – с другой [18]. Во время поступления воды через верхний бьеф наблюдается промывка водохранилища, которая особенно сильно проявляется в каньоне затопленного русла р. Дон. Этот процесс можно сравнить с шунтированием кровеносных сосудов человека. Происходит в одних местах акватории взмучивание верхних слоев донных отложений, а в других, наоборот, – лавинообразное накопление. Этот процесс сопровождается сначала усилением пузырькового транспорта метана, а после окончания нагона воды и перемешивания водных масс, доминированием диффузионного массопереноса и выравниванием концентраций и потоков метана в толще воды и по акватории водоема. Подобное явление было зафиксировано в Азовском море в штормовых условиях и при относительно безветренной погоде [2, 19].

В работе [5] представлена концептуальная модель, которая продемонстрировала как влияет эксплуатация водохранилища, вызывающая в нем колебания уровня воды (WLF), на эмиссию (выбросы) CH_4 . Однако ограниченность этой концептуальной модели состоит в том, что она указывает пути, которые могут способствовать регулированию поступления и попусков воды в процессе эксплуатации водохранилища, но совершенно не ясно, как это может помочь сокращению эмиссионных потоков метана. По мнению [5], для частичного решения проблемы необходимо субдневное разрешение, чтобы соответствовать разрешению наполнения водохранилища и попускам из него (контрольная переменная), а также моделировать глубинную стратификацию и оборот воды. Очевидно, эти задачи трудно реализовать, а цель – управлять потоками парниковых газов только с помощью качественной виртуальной модели, вряд ли, может быть достигнута.

Авторами [20, 21] была создана одномерная термогидродинамическая и биогеохимическая модель LAKE, способная дать уточненные оценки (инвентаризацию) годового потока метана для водоемов с учетом их основных морфометрических, гидрологических характеристик, а также атмосферного воздействия. Однако, как отмечено в работе [6], эта модель требовала верификации на конкретном водном объекте, которым является водохранилище. Авторы протестировали механистическую модель LAKE 2.3 на ее способность прогнозировать выбросы метана (CH_4) из водоемов. Оценка эмиссионных потоков CH_4 из Можайского водохранилища (Московская обл.), полученная с помощью модели, показала хорошее согласие с инструментальными натурными наблюдениями по ряду параметров водной экосистемы [6]. Сделан вывод [6], что результаты исследования могут быть использованы для разработки механистических моделей и стать необходимым шагом на пути к региональному и глобальному прогнозированию выбросов метана из озер с использованием LAKE 2.3.

В ранее проведенных исследованиях на Рыбинском водохранилище [19] в донных отложениях Шекснинского плеса, куда поступают сточные воды Череповецкого металлургического комбината, была установлена прямолинейная связь между концентрацией метана и содержаниями нефтяных углеводородов, смолистых компонентов и их суммы. Кроме легких углеводородов и смолистых компонентов в донных отложениях обнаружены 2-3-4-ядерные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), идентифицированы следующие соединения: нафталин, метилнафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, пирен, бенз(а)пирен и другие. Это свидетельствовало о положительном влиянии органических загрязняющих веществ на содержание и потоки метана в воде водотоков и водоемов.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОСТАВУ РАБОТ И ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ В ЦИМЛЯНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Для установления ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков (выбросов) и поглощения (стоков) CH_4 и их баланс, а также оценки суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища

авторами предлагается следующий состав исследований и оптимизация, по отношению к ранее представленной в [11], схемы расположения станций мониторинга (рисунок).

1. На станциях мониторинга в различные гидрологические фазы (период весеннего перемешивания, пик половодья, летняя стратификация, после ледостава) провести водные и наземные экспедиционные исследования Калачского, Чирского, Центрального и Приплотинного участков Цимлянского водохранилища для отбора проб воды и донных отложений, а также натуральных измерений удельных потоков и стоков CH_4 на границах раздела «вода – атмосфера». Точки наблюдений планируется располагать на обозначенных выше участках таким образом, чтобы исследовать как глубоководные, так и мелководные зоны водохранилища. С целью оценки эмиссии CH_4 при сбросе вод в нижний бьеф водохранилища во все периоды наблюдений планируется выполнять отбор проб воды для определения его концентраций до и после плотины.

В ходе экспедиционных исследований отбор проб будет проводиться в поверхностном и придонном слоях и в 0–2 см горизонте донных отложений. В отдельных глубоководных точках отбор проб воды также будет выполнен и в промежуточных слоях. В точках, расположенных возле берега, – только в поверхностном слое. С целью изучения распределения метана и других гидрохимических показателей по вертикальному профилю донных отложений, помимо 0–2 см горизонта, в отдельных точках будут опробованы и более глубокие горизонты (2–5 см, 5–10 см, 10–15 см и далее через каждые 5–10 см отобранного керна).

При проведении экспедиционных исследований в точках отбора проб воды и донных отложений, а также измерений удельных потоков и стоков CH_4 будут учитываться гидродинамические и гидрометеорологические характеристики (атмосферное давление, скорость и направление ветра, волнение, скорость течения, температура воздуха). В воде водохранилища для корреляционного анализа тесноты связей с концентрациями и потоками CH_4 будут измерены следующие гидрохимические показатели: температура, цветность, прозрачность, взвешенные вещества, общий органический углерод, растворенный кислород, БПК, ХПК, электропроводность, рН, аммонийный, нитратный и нитритный азот, фосфат-ионы. В донных отложениях будут контролироваться показатели: Eh и рН, влажность и плотность, аммонийный и нитратный азот, ионы калия, кальция, магния и натрия, сульфат-ион, хлорид-ион, фосфат-ион, ацетат, оксалат, формиат, общий азот и фосфор, органическое вещество, нефть и нефтепродукты и гранулометрический состав. Также будет проведено визуальное описание донных отложений (цвет, запах, консистенция, структура, литологический тип и т. д.).

Для расчета баланса органического вещества как одного из основных факторов, контролирующих формирование концентраций и потоков CH_4 , необходимо провести определение концентрации ОВ в водах р. Дон, поступающих в верхний бьеф; в устьях притоков; в водах водохранилища, сбрасываемых в нижний бьеф (перед плотинной); в жидких и твердых атмосферных выпадениях и в склоновом стоке.

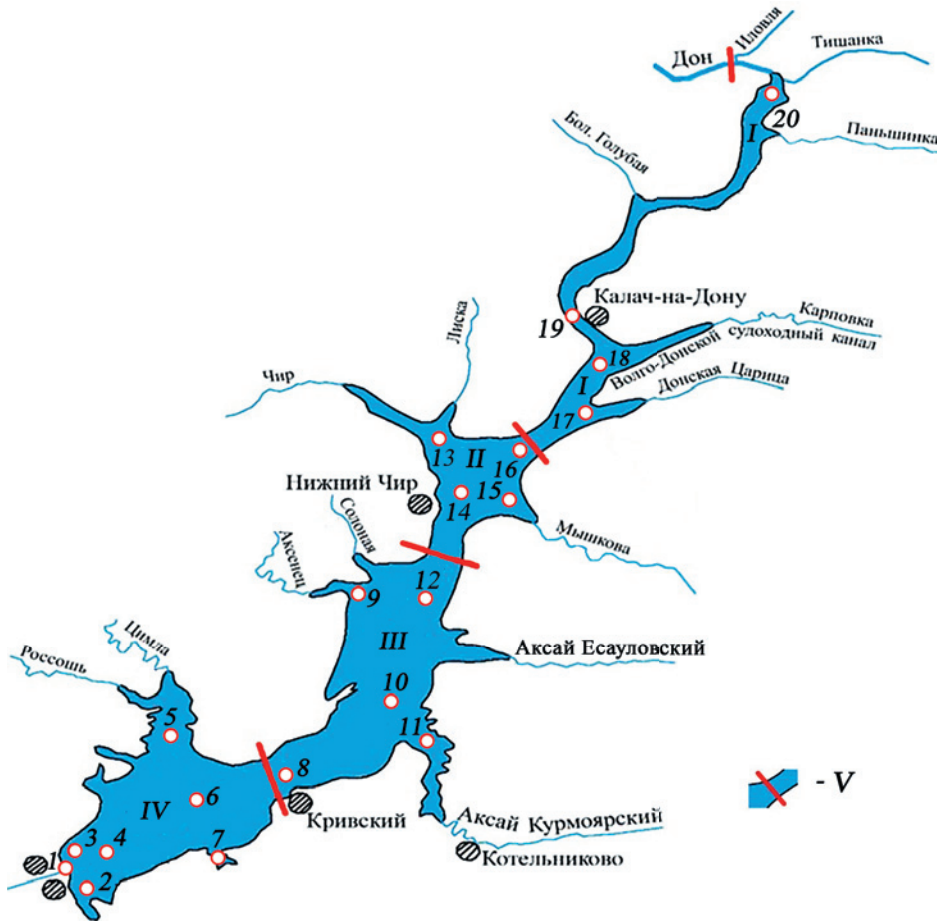


Рисунок. Картограмма расположения станций мониторинга концентраций и потоков метана в Цимлянском водохранилище: I – Калачский участок; II – Чирский участок; III – Центральный участок; IV – Приплотинный участок; V – границы участков.

Figure. Schematic map of the methane concentration and flow monitoring stations' location in the Tsimlyansk reservoir: I – is the Kalach range; II – is the Chir range; III – is the Central range; IV – is the Near-Dam range; V – are the ranges' boundaries.

Отбор проб воды будет выполняться при помощи батометра Молчанова. Донные отложения в точках с глубинами более 1 м отбираться при помощи ударной трубки конструкции ГОИН. Донные отложения в точках с глубинами менее 0,7 м – с помощью специальной трубки диаметром 45 мм и поршнем для выдавливания керна.

Вертикальное зондирование водной толщи с определением температуры, электропроводности воды, содержания растворенного кислорода планируется производить с помощью мультипараметрических зондов, прозрачность воды – по диску Секки. Количественное определение растворенного органического углерода – методом высокотемпературного окисления с использованием анализатора углерода.

Отбор, транспортировка, хранение проб воды и донных отложений и последующее определение CH_4 будут проведены согласно аттестованным методикам^{3,4}. Измерение CH_4 выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Параллельно с отбором проб на метан будет отбираться навеска отложений для определения массовой доли сухого веса, их влажности и плотности. Величины Eh и pH донных отложений будут измерены с помощью электродов портативного pH метра иономера – «Экотест 2000».

Определение удельных потоков метана с поверхности воды Цимлянского водохранилища будет выполняться камерным методом с помощью накопительных камер – ловушек [3, 22]. Экспозиция ловушек в накопительном режиме составит в среднем 20 мин. Удельный поток CH_4 будет рассчитываться по скорости изменения их концентрации в воздушной фазе камер с учетом «холостых» проб, отбираемых сразу после установки ловушек (экспозиция 0 минут). Определение концентрации CH_4 в воздушной фазе ловушек будет проведено газохроматографическим методом с помощью методических приемов, описанных в работах [2, 3].

2. Для оценки вклада прибрежно-водной растительности в общую эмиссию CH_4 с Цимлянского водохранилища в разные вегетационные периоды (начало, пик и конец вегетации) запланировано измерение удельных потоков и стоков CH_4 над зарослями доминирующих растительных сообществ. В основном, это обладающие аэренхимой тростник южный и рогозы [23]. Стандартный метод оценки скорости выделения метана растением подразумевает герметизацию целого растения или его частей в закрытых камерах (или газонепроницаемых мешках) и последующее измерение концентрации метана в камере через определенный промежуток времени [3]. Определение площади зарастания прибрежных зон в Цимлянском водохранилище для последующего расчета суммарной эмиссии CH_4 растительностью будет рассчитано по космоснимкам с корректировкой ареалов распространения в ходе наземных экспедиционных исследований.

3. Для оценки вклада зон осушки в общую эмиссию CH_4 с Цимлянского водохранилища в период низкого уровня воды планируется провести измерения удельных потоков CH_4 в зоне осушки на разнотипных по литологическому составу обнажившихся грунтах (пески, илы). Определение площади осушаемых грунтов будет проведено по космоснимкам и батиметрическим картам.

4. В летний период необходимо провести суточные наблюдения за удельными эмиссионными потоками и стоками CH_4 как на удаленной от берега, так и на прибрежной станциях Калачского и Приплотинного участков с интервалом в три часа. Установленные особенности суточной динамики эмиссии CH_4 будут учтены при расчете его суммарных годовых эмиссионных потоков и стоков в Цимлянском водохранилище.

³ РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2012. 23 с.

⁴ РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2013. 19 с.

5. На удаленных от берега станциях суточных наблюдений с помощью седиментационных ловушек будут отобраны пробы взвешенного вещества для изучения объемов его осаждения в течение суток, а также определения содержания органического вещества, минерального и гранулометрического составов, что позволит оценить скорости осадконакопления и объема поступления в донные отложения органического вещества для расчета его баланса.

6. В результате проведенных работ планируется разработать и создать ГИС-проект и цифровой банк пространственных данных, содержащий информацию о гидрометеорологических и гидрологических условиях, гидрохимических показателях воды и донных отложениях в разные гидрологические фазы, а также удельных потоках и стоках CH_4 на границе «вода – атмосфера» на различных участках Цимлянского водохранилища.

7. Далее необходимо проанализировать влияние различных природных и антропогенных факторов и процессов, в т. ч. режима эксплуатации Цимлянского водохранилища на концентрации CH_4 , а также потоки и стоки CH_4 в системе «донные отложения – вода – атмосфера». Для этого следует выполнить статистическую обработку, обобщение и анализ данных, полученных в ходе вышеописанных работ, а также провести корреляционный анализ блока данных для изучения связи потоков и стоков CH_4 в системе «вода – атмосфера» с измеряемыми гидрохимическими показателями в воде и донных отложениях, а также глубиной и гранулометрическим составом осадков.

Полученные в результате вышеперечисленных работ данные позволят:

- создать на примере Цимлянского водохранилища ансамбль концептуальных балансовых моделей потоков O_2 , CO_2 и CH_4 ;
- рассчитать баланс органического вещества в Цимлянском водохранилище;
- провести расчет суммарных годовых эмиссий и стоков CH_4 в Цимлянском водохранилище и их баланса с оценкой вклада: прибрежных зон, заросших и не заросших растительностью; зон осушки; сброса вод водохранилища в нижний бьеф;
- определить ключевые факторы, влияющие на формирование эмиссионных потоков и стоков CH_4 и его баланс в Цимлянском водохранилище;
- создать концептуальные модели, описывающие причинно-следственные связи между эмиссионными потоками и стоками CH_4 и ключевыми природными и антропогенными факторами, воздействующими на экосистему Цимлянского водохранилища;
- на основе концептуальных моделей создать математические модели, позволяющие моделировать динамику эмиссии и поглощения CH_4 в Цимлянском водохранилище;
- разработать рекомендации по организации и ведению мониторинга за эмиссией CH_4 в водохранилищах, расположенных в степной зоне России;
- разработать и внедрить новые и модифицировать имеющиеся образовательные программы с целью подготовки научных и педагогических кадров в области разработки и испытания технологий контроля баланса климатически активных газов.

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ факторов и процессов трансформации ОВ в воде и донных отложениях в чаше водохранилища однозначно указывает на доминирующую роль в образовании парниковых газов внутриводоемных процессов при участии внешних источников, находящихся на территории водосборного бассейна. Водная толща является транзитным резервуаром, нижняя граница которого граничит с донными отложениями, а верхняя с атмосферой. Именно с поверхности акватории, за исключением случаев его частичного или полного обмеления, происходит выделение основной массы CO_2 , CH_4 в атмосферу, объемы которых в соответствии с идеологией борьбы с изменением климата, мы планируем не только изучить, но и разработать в будущем предложения по методике оценки эмиссии CH_4 и ее сокращению. Поступающее в чашу водохранилища из различных источников ОВ является доминирующим фактором, который определяет направленность и биохимические механизмы образования климатически активных газов, в то время как гидрологический и гидрохимический режимы способны оказывать на их производство косвенное влияние. Также является, хотя и очевидной, но недостаточно изученной роль ОВ различного происхождения и состава в генерации метана.

Проблема прогнозирования и сокращения выбросов CH_4 Цимлянского водохранилища, как и других ему подобных, не может быть решена без детального изучения особенностей функционирования этой аквальной экосистемы во времени и пространстве, а именно, внутриводоемных факторов и процессов, и влияния на них сочетанных гидрологических событий на водосборах. Предложен подробный план экспедиционных и экспериментальных работ, направленных на установление вклада ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков и стоков CH_4 и его баланс, а также оценку суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища.

Только после проведения полного цикла сезонных экспедиционных работ и получения репрезентативных гидрологических, биологических и гидрохимических результатов, станет возможной разработка и создание адекватной модели формирования потоков метана и предложений по их сокращению в Цимлянском водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WMO. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2018 // Proceedings of the Global Atmosphere Watch, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 25 November 2019.
2. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов на-Дону, М., 2007. 330 с.
3. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Мельников Е. В. Эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области // Почвоведение. 2023. № 8. С. 889–902.
4. Rocher-Ros, G.; Stanley, E.H.; Loken, L.C.; Casson, N.J.; Raymond, P.A.; Liu, S.; Amatulli, G.; Sponseller, R.A. Global methane emissions from rivers and streams. *Nature*. 2023. 621. P. 530–535.
5. Henriette I. Jager, Rachel M. Pilla, Carly H. Hansen, Paul G. Matson, Bilal Iftikhar † and Natalie A. Griffiths Understanding How Reservoir Operations Influence Methane Emissions: A Conceptual Model // *Water*. 2023. 15. 4112.

6. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic Modeling of the Variability of Methane Emissions from an Artificial Reservoir // *Water*. 2024. 16(1):76. DOI: org/10.3390/w16010076.
7. Barros N.; Cole J.J.; Tranvik L.J.; Prairie Y.T.; Bastviken D.; Huszar V.L.M.; del Giorgio P.; Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nature Geoscience*. 2011. 4. P. 593–596.
8. Felix-Faure J., Gaillard J., Descloux S., Chanudet V., Poirel A., Baudoin J.M., Avrillier J.N., Millery A., Dambrine E. Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France) // *Ecosystems*. 2019. 22. P. 312–330.
9. Хрусталеv Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л.: Наука, 1989. 260 с.
10. Студеникина Е.И., Толоконникова Л.И., Воловик С.П. Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. М.: ФГУП «Нацрыбресурсы», 2002. 188 с.
11. Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Беляев А.И., Гарькуша Д.Н., Усова Е.В., Крукиер М.А., Тамбиева Н.С., Дмитрик Л.Ю., Ковалев Е.А. Экспериментальные исследования концентраций и потоков метана в аквальных экосистемах (с элементами моделирования) как теоретико-методологическая основа для создания карбонового полигона // Сб. трудов Всерос. научно-практ. конф. с межд. уч. «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг». Т. 1. Южный федеральный университет. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 29–39.
12. Вавилин В.А., Рытов С.В., Локшина Л.Я. Баланс между гидролизом и метаногенезом при анаэробном разложении органического вещества // *Микробиология*. 1997. Т. 66. № 6. С. 846–851.
13. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Изд-во «Наука», 1970. 440 с.
14. Winfrey M.R., Zeikus I.G. Effect of sulphate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments // *Applied and Environmental Microbiology*. 1977. Vol. 22. № 2. P. 275–281.
15. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин) // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 6. С. 88–96.
16. Wang, Chunlin, Yuhan Xu, Siyue Li, and Xing Li. 2023. «Interconnected River–Lake Project Decreased CO₂ and CH₄ Emission from Urban Rivers» // *Water*. 15. No. 11: 1986.
17. Федоров Ю.А. К вопросу о классификации лечебных грязей—Экологические проблемы // Взгляд в Будущее: сб. трудов VIII Международной научно-практической конференции (БП и и СОТ «Витязь»—БП и СОТ «Лиманчик» 8–11 сентября; 2017) / Южный федеральный университет / под. ред. Ю.А. Федорова. Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. С. 447–456.
18. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Крукиер М.А. Температура и ее влияние на эмиссию метана из водных объектов (по результатам экспериментального и математического моделирования) // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион*. 2012. № 6. С. 99–101.
19. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища: распределение и биогеохимические особенности образования // Деп. в ВИНИТИ РАН 02.06.99. № 1756-В-99. Ростов-на-Дону, 1999. 82 с.
20. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykossov V., Vesala T. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geo/ scientific. Model Development*. 2016. 9. P. 1977–2006.
21. Stepanenko, V.; Valerio, G.; Pilotti, M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems Impact Factor, Indexing, Ranking*. 2020. 12. e21063.
22. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 48–58.

23. Калинина С.Г. Эколого-флористический и рыбохозяйственный аспект высшей водной растительности Цимлянского водохранилища // Сб. статей III Межд. научно-практ. конф. «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов». М.: Планета, 2013. С. 416–430.

REFERENCES

1. WMO. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2018. *Proceedings of the Global Atmosphere Watch*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 25 November 2019.
2. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. Methane in aquatic ecosystems. 2nd edition, revised and supplemented. Rostov-na-Donu, M., 2007. 330 c.
3. Garkusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Melnikov E.V. Methane emission by rise fields of Rostov Oblast. *Soil science*. 2023. No. 8. P. 889–902.
4. Rocher-Ros, G.; Stanley, E.H.; Loken, L.C.; Casson, N.J.; Raymond, P.A.; Liu, S.; Amatulli, G.; Spon-seller, R.A. Global methane emissions from rivers and streams. *Nature*. 2023. 621. 530–535.
5. Henriette I. Jager, Rachel M. Pilla, Carly H. Hansen, Paul G. Matson, Bilal Iftikhar † and Natalie A. Griffiths Understanding How Reservoir Operations Influence Methane Emissions: A Conceptual Model. *Water*. 2023. 15. 4112.
6. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic Modeling of the Variability of Methane Emissions from an Artificial Reservoir. *Water*. 2024. 16(1):76. <https://doi.org/10.3390/w16010076>
7. Barros N.; Cole J.J.; Tranvik L.J.; Prairie Y.T.; Bastviken D.; Huszar V.L.M.; del Giorgio P.; Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geo-science*. 2011. 4. P. 593–596.
8. Felix-Faure J., Gaillard J., Descloux S., Chanudet V., Poirel A., Baudoin J.M., Avriillier J.N., Millery A., Dambrine E. Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France). *Ecosystems*. 2019. 22. P. 312–330.
9. Khrustalev Y.P. Laws of sediments accumulation in inland seas of the arid zone. L.: Nauka, 1989. 260 p.
10. Studenikina E.I., Tolokonnikova L.I., Volovik S.P. Microbiological processes in the Sea of Azov in the conditions of anthropogenic impact. M.: Natsrybresursy, 2002. 188 p.
11. Fedorov Y.A., Kosolapov A.E., Belayev A.I., Garkusha D.N., Usova E.V., Krukier M.L., Tambieva N.S., Dmitrik L.Y., Kovalev E.A. Experimental studying of the methane concentrations and flows in aquatic ecosystems (with some elements of modelling) as a theoretical/methodical basis for establishment of a carbon ground. *Proceedings of "Water resources in the conditions of global chal-lenges: ecological problems, management, monitoring" scientific/practical international conference*. Vol. 1. Southern Federal University. Novochoerkassk: Lik, 2023. P. 29–39.
12. Vavilin V.A., Rytov S.V., Lokshina L.Y. The balance between hydrolyze and methane genesis in organic matter anaerobic decomposition. *Microbiology*. 1997. Vol. 66. No. 6. P. 846–851.
13. Kuznetsov S.I. Micro/flora of lakes and its geo/chemical activities. L.: Izd-vo Nauka, 1970. 440 p.
14. Winfrey M.R., Zeikus I.G. Effect of sulphate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 1977. Vol. 22. № 2. P. 275–281.
15. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N. Methane as an indicator of the fresh water bodies' ecological status (the lakes Valdai and Uzhin as examples). *Meteorology and hydrology*. 2004. No. 6. P. 88–96.
16. Wang, Chunlin, Yuhan Xv, Siyue Li, and Xing Li. 2023. «Interconnected River–Lake Project De-creased CO₂ and CH₄ Emission from Urban Rivers». *Water*. 15. No. 11: 1986.
17. Fedorov Y.A. On the issue of the therapeutic muds classification – Ecological problems. Vzgl'yad v budushchey. *A view into the Future. Proceedings of VIII International scientific/practical conference "Vityaz" and "Limanchik", September 8-11, 2017*. Southern Federal University. Edited by Y.A. Fedorov. Rostovna-na-Donu, Taganrog: Publishing House of Southern Federal University, 2017. P. 447–456.
18. Fedorov Y.A., Garkusha D.N., Krukner M.L. Temperature and its influence upon the methane mission from water bodies (according to the experimental and mathematic modelling results). Universities' newsletters. Northern Caucasus Region. 2012. No. 6. P. 99–101.
19. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. Methane in the Tsimlyansk reservoir water and bottom sediments: distribution and bio/geo/chemical special features of for-mation. Deposited in VINITI RAN 02.06.99. No. 1756-B-99. Rostov-na-Donu, 1999. 82 p.

20. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykossov V., Vesala T. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geo/scientific Model Development*. 2016. 9. P. 1977–2006.
21. Stepanenko, V.; Valerio, G.; Pilotti, M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems Impact Factor, Indexing, Ranking*. 2020. 12, e21063.
22. Garkusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S. Calculation of the methane balance elements in the Sea of Azov and the World Ocean aquatic ecosystems based on empiric formulas. *Meteorology and hydrology*. 2016. No. 6. P. 48–58.
23. Kalinina S.G. Ecological/floristically and fishery aspect of supreme aquatic vegetation of the Tsimplyansk reservoir. *Collection of articles of III International scientific/practical conference "Studying, preservation and restoration of natural landscapes"*. M.: Planeta, 2013. P. 416–430.

Сведения об авторах:

Юрий Александрович Федоров, д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Рихарда Зорге, д. 40; ORCID: 0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Дмитрий Николаевич Гарькуша, канд. геогр. наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Рихарда Зорге, д. 40; ORCID: 0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Алексей Евгеньевич Косолапов, д-р техн. наук, профессор, директор ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0000-0001-2345-6789, e-mail: akosol@mail.ru

Усова Елена Валентиновна, заведующая отделом исследования качества вод и аналитической деятельности, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, гидрохимик 1 категории, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0009-2196-809X, e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Верещагин Михаил Алексеевич, гидрохимик 1 категории, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Беляев Александр Иванович, д-р с.-х. наук, профессор, директор ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения российской академии наук», Россия, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 97; ORCID: 0000-0001-8077-7052; e-mail: director@vfanc.ru

About the authors:

Yuriy A. Fedorov, Professor, Doctor of Geographic Sciences, Head, Chair of Physical Geography, Ecology and Nature Protection. Institute of Earth Sciences, Southern Federal University; ul. Rikharda Zorge, 40. Rostov-na-Donu, 344090, Russia; ORCID: 0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dmitry N. Garkusha, Associate Professor, Candidate of Geographic Sciences, Chair of Physical Geography, Ecology and Nature Protection. Institute of Earth Sciences, Southern Federal University; ul. Rikharda Zorge, 40. Rostov-na-Donu, 344090, Russia; ORCID: 0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfned.ru

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0000-0001-2345-6789, e-mail: akosol@mail.ru

Elena V. Usova, Head, Department of Water Quality Investigation and Analytical Activities, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Evgenia L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, 1 category Hydro/chemistry Expert, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0009-2196-809X, e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Mikhail A. Vereshchagin, 1 category Hydro/chemistry Expert, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Aleksandr I. Belyaev, Professor, Doctor of Geographic Sciences, Director, Federal Scientific Center of Agro/ecology, Integrated Land-reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences, pr-t Universitetskii, 97, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0001-8077-7052; e-mail: director@vfanc.ru