

Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище

М.Г. Гречушникова^{1,2}  , И.А. Репина³ , В.С. Казанцев³ , Е.В. Усова⁴ ,
М.А. Верещагин⁴ , Е.Л. Анпилова⁴ 

 allavis@mail.ru

¹ ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия

³ ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук», Москва Россия

⁴ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование посвящено анализу результатов измерения содержания и удельного потока метана с поверхности Цимлянского водохранилища по данным измерений в летне-осенний период 2021–2023 гг. Крупнейший искусственный водный объект на юге Европейской территории России недостаточно изучен в отношении эмиссии парниковых газов. **Методы.** Определение эмиссии проводилось методом «плавучих камер», пробы обработаны на хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Комплекс работ включал изучение характеристик донных отложений, распределения температуры воды и растворенного кислорода. **Результаты.** По полученным результатам выявлена межгодовая изменчивость содержания и удельного потока метана, связанная с особенностями гидрологической структуры Цимлянского водохранилища в зависимости от погодных условий, а также пространственная изменчивость, обусловленная различием характера донных отложений и глубины станций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Цимлянское водохранилище, метан, донные отложения, температура воды, растворенный кислород, стратификация.

Финансирование: Анализ данных выполнен в рамках работ по гранту РФФ 24-27-00034.

Для цитирования: Гречушникова М.Г., Репина И.А., Казанцев В.С., Усова Е.В., Верещагин М.А., Верещагин М.А., Анпилова Е.Л. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-80-100.

Дата поступления 22.01.2024.

First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir

Maria G. Grechushnikova^{1,2}  , Irina A. Repina³ , Vladimir S. Kazantsev³ ,
Elena V. Usova⁴ , Mikhail A. Vereshchagin⁴ , Eugenia L. Anpilova⁴ 

 allavis@mail.ru

© Гречушникова М.Г., Репина И.А., Казанцев В.С., Усова Е.В., Верещагин М.А., Верещагин М.А., Анпилова Е.Л., 2024

¹Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow University, Moscow, Russia

³Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Moscow, Russia

⁴Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-na-Donu, Russia

ABSTRACT

Relevance. This study is devoted to the analysis of results of measuring methane content and specific flow from the Tsimlyansk reservoir surface according to the data collected in the summer-autumn period of 2021–2023. The greatest artificial water body in the south of the Russia's European territory is not adequately surveyed in respect of the greenhouse gases emission. **Methods.** Determination of the emission was carried out with the “floating chamber” method; the samples were processed with Chromatic-Crystal 500.2 chromatograph. Work package included investigation of the bottom sediments characteristics, water temperature and dissolved oxygen distribution. **Results.** The obtained results revealed inter/annual variability of the methane content and specific flow connected with special features of the Tsimlyansk reservoir in terms of weather conditions, as well as spatial variability caused by the difference in the bottom sediments character and the stations' depth.

Key words: the Tsimlyansk reservoir, methane, bottom sediments, water temperature, dissolved oxygen, stratification.

Financing: The data analysis has been done within the framework of works on RNF 24-27-00034 grant.

For citation: Grechushnikova M.G., Repina I.A., Kazantsev V.S., Usova E.V., Vereshchagin M.A., Anpilova E.L. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 80–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-80-100.

Received 22.01.2024.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с учетом выбросов парниковых газов изучение эмиссии метана различными экосистемами остается актуальной научной задачей. Искусственные водоемы являются дополнительным антропогенным источником метана. Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира проведено достаточно много, но при этом они значительно различаются – от 2 до 122 Тг/год ($69 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [1], $95\text{--}122 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [2], $2\text{--}4 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [3], $4,8 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [4], $18,7 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [5], $17,9 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [6], $10,1 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [7]). Такое существенное различие оценок связано с тем, что измерения проводились в разное время, различными методами, не учитывалась межсезонная и межгодовая изменчивость, отсутствовала единая методика оценки суммарной площади водоемов. Кроме того, в проведенных исследованиях отличаются и методы группировки водохранилищ.

Для разработки количественных значений квот выбросов парниковых газов необходимо изучить пространственно-временные масштабы их эмиссии из водохранилищ. По сравнению с исследованиями, проведенными в Бразилии, Канаде, США, Китае и европейских странах, в России такими наблюдениями до недавнего времени было охвачено мало водоемов [7, 8]. Согласно выполненным ранее исследованиям [6, 9, 10], основными факторами, влияю-

щими на эмиссию метана, являются трофический статус водоема, его глубина, термический и кислородный режимы, условия водообмена. Именно многофакторность процессов затрудняет параметризацию удельного потока и его диагностические и прогностические расчеты, поскольку помимо диффузного потока метан может выделяться в виде пузырьков. Этот процесс носит весьма нестационарный характер, зависит от колебаний атмосферного давления, активности бентоса, он неравномерен в пространстве [11].

Большой разброс характерных значений удельного потока метана с водохранилищ в пределах одной климатической зоны (полярной, умеренной субтропической и тропической) ставит под сомнение глобальные оценки эмиссии метана с водоемов [4], поскольку этот подход не учитывает такие особенности водоемов, как морфологическое строение и проточность. Ввиду уникальности каждого искусственного водного объекта даже при наличии их типизации и общих черт гидроэкологического режима невозможно произвести измерения в абсолютном большинстве водоемов для надежной оценки удельного потока. Дополнительным инструментом в этой ситуации может стать математическое моделирование [12, 13], но для настройки модели конкретного водоема необходимы данные о его режиме и входные параметры для валидации.

Цимлянское водохранилище – один из крупнейших водоемов на юге Европейской территории России, аккумулирующий сток р. Дон. В пределах его акватории сочетаются различные типы аквальных комплектов, что свидетельствует о большой пространственной изменчивости характеристик водоема. Цель исследования – измерение и анализ содержания и удельного потока метана с поверхности Цимлянского водохранилища. Выбор данного водного объекта обусловлен его малой изученностью по сравнению с водохранилищами Волжского каскада [14].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цимлянское водохранилище на р. Дон образовано в 1952 г. Цимлянской плотинной. Мелководная зона с глубинами до 2 м занимает при НПУ ~10 % площади. Зона осушки может занимать до четверти от максимальной площади акватории водохранилища (при падении уровня воды до 31,5 м БС)¹. Акваторию водохранилища подразделяют на четыре плеса (Верхний – Калачёвский, Чирской, Потёмкинский – Центральный и Приплотинный), которые различаются морфометрическими, гидрологическими и биологическими особенностями. Водосборная площадь Цимлянского водохранилища (255 000 км²) сильно распахана и подвержена водной и ветровой эрозии. В пределах площади водосбора располагаются крупные промышленные центры – города Липецк и Воронеж.

Ледостав на Цимлянском водохранилище наблюдается с середины декабря по конец марта. Весной верхний участок водохранилища быстрее освобождается ото льда, принимая теплые паводковые воды, осенью приплотинный участок замерзает почти на месяц позже, чем верхний. Летом разница темпе-

¹ Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 291 с.

ратуры воды между участками почти не наблюдается: наибольшие градиенты температуры воды (до 1,5 °С/м) отмечаются в июне и в июле. Суточная амплитуда температуры воды при ясной штилевой погоде может достигать 5 °С¹.

Кислородный режим водохранилища в период открытой воды благоприятный. При интенсивном «цветении» фитопланктона в поверхностных горизонтах отмечается перенасыщение воды кислородом. Дефицит кислорода даже в поверхностных горизонтах в летний период наблюдается, как правило, в аномально жаркие периоды. В придонных горизонтах дефицит кислорода присутствует регулярно в конце июля-начале августа. Ежегодно на Цимлянском водохранилище наблюдается «цветение» воды вследствие интенсивного роста водорослей. Сообщество фитопланктона характеризуется доминированием синезеленых, в т. ч. образующих токсины видов *Microcystis aeruginosa*, *Aphanisomenon flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae* [15]. Причина сильного «цветения» – особенности гидрометеорологических условий Цимлянского водохранилища: прогрев толщи воды весной, продолжительные высокие значения температуры летом, сохранение их осенью в сочетании с длительными штилевыми периодами и обеспеченностью биогенными веществами. По биомассе, численности фитопланктона и концентрациям в воде хлорофилла «а» трофический статус водохранилища колеблется по участкам в широком диапазоне: от мезотрофного (на верхнем участке) до эвтрофного и даже гипертрофного (на приплотинном) [16].

Донные отложения в Цимлянском водохранилище представлены песками и илами, включающими илистый песок, песчанистый и глинистый ил. На дне водохранилища происходит накопление большого количества раковин моллюсков, приводящее местами к формированию слоя ила с ракушками. На верхнем участке водоема отложения формируются за счет наносов, поступающих с речным стоком Дона, на среднем и нижнем – за счет обрушения и перестроения берегов [17]. Наиболее мелкозернистые грунты распространены в старом русле р. Дон. Глинистые илы обнаружены в устьях притоков Дона, образующих в настоящее время заливы рек Аксай Курмоянский и Чир. Кроме того, илистые грунты распространены вблизи активно размываемых берегов. Глинисто-песчаные илы широко представлены на приплотинном участке¹, пески в виде сплошного массива – в Кривском сужении. Цимлянское водохранилище характеризуется широким распространением легко разрушаемых лёссовидных пород и аллювиально-флювиогляциальных песков в обрывах, имеет низкую лесистость берегов, поэтому их разрушение с разной степенью интенсивности происходит и в настоящее время.

Цимлянское водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока, используется комплексно для судоходства, ирригации, гидроэнергетики, рыбного хозяйства, водоснабжения, рекреации. Серьезные экологические проблемы водоема обусловлены загрязнением его вод хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами (относится к классу загрязненных и грязных, 50 % проб воды не отвечает санитарно-гигиеническим нормам), ежегодным интенсивным развитием синезеленых водорослей (во время «цветения» в водохранилище часто преобладают виды, способные выделять в водную среду

токсины), вплоть до нарушения нормальной работы водозаборов. Наблюдаются также интенсивные процессы разрушения берегов: 41,3 % протяженности берегов подвержены абразии. Общий уровень загрязненности Цимлянского водохранилища по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды (УКИЗВ) многие годы держится на уровне 3–4 классов качества воды – «загрязненная» – «грязная», особенно на верхнем участке водохранилища, где отмечены единичные случаи высокого загрязнения нефтепродуктами [18].

Комплексные съемки проведены 9–10 августа 2021 г., 8 августа 2022 г., 17–18 июля в приплотинной части Цимлянского водохранилища и 27 сентября – 1 октября 2023 г. – на акватории всего водоема. На рис. 1 представлено расположение станций отбора проб.

Измерение температуры воды, растворенного кислорода и электропроводности воды производили зондами YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0,1 мг/л, 0,2 °С и 1 мкСм/см. Пробы воды отбирали батометром Рутнера объемом 0,5 л. Метеорологические параметры (температуру воздуха, скорость ветра и давление) измеряли метеостанцией Kestrel 5500 Weather на борту судна.

Удельный поток исследуемых парниковых газов из воды в атмосферу определяли методом «плавучих камер» [19] в трехкратной повторности. На станции герметичные пластиковые камеры с известными объемом и площадью основания экспонировались на водной поверхности в течение 20 мин. В склянки объемом 20 мл, предварительно заполненные в лаборатории насыщенным раствором NaCl, шприцом отбирали воздух из камеры в начале и в конце времени экспозиции. Значения удельного потока метана определяли по разности концентрации метана в камере в начале и в конце эксперимента. Во время экспозиции камер производилась запись метеопараметров с метеостанции. Глубину станции измеряли эхолотом, фиксировали начальные и конечные координаты дрейфа.

Во время экспозиции камер параллельно отбирали пробы воды с разных горизонтов на станциях батометром Рутнера, из которого воду откачивали в шприц объемом 60 мл, стравливали лишний объем воды до 40 мл и набирали 20 мл воздуха. Затем интенсивно встряхивали шприц 2–3 мин, чтобы перевести растворенный метан в равновесие с газообразной фазой [20]. Далее 20 мл воздуха закачивали в склянку с раствором NaCl, как и в описанном выше методе отбора воздуха из камер. Чтобы учесть содержание метана в воздухе, на каждой станции измерений, где производился отбор проб воды на содержание метана, отдельно отбирали пробу воздуха.

Для определения концентрации метана в полученной пробе применяли газовый хроматограф Хроматэк-Кристалл 5000.2 производства ЗАО «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором. Определение содержания метана в каждой пробе проводили в трехкратной повторности. В качестве газа-носителя использовали азот (99,999 % чистоты) с расходом 30 мл/мин. Расход водорода – 20 мл/мин, воздуха – 200 мл/мин. Калибровку хроматографа осуществляли с использованием газовых смесей с концентрациями метана 0,49 ppm, 5,3 ppm, 10,3 ppm, 100 ppm и 1000 ppm.

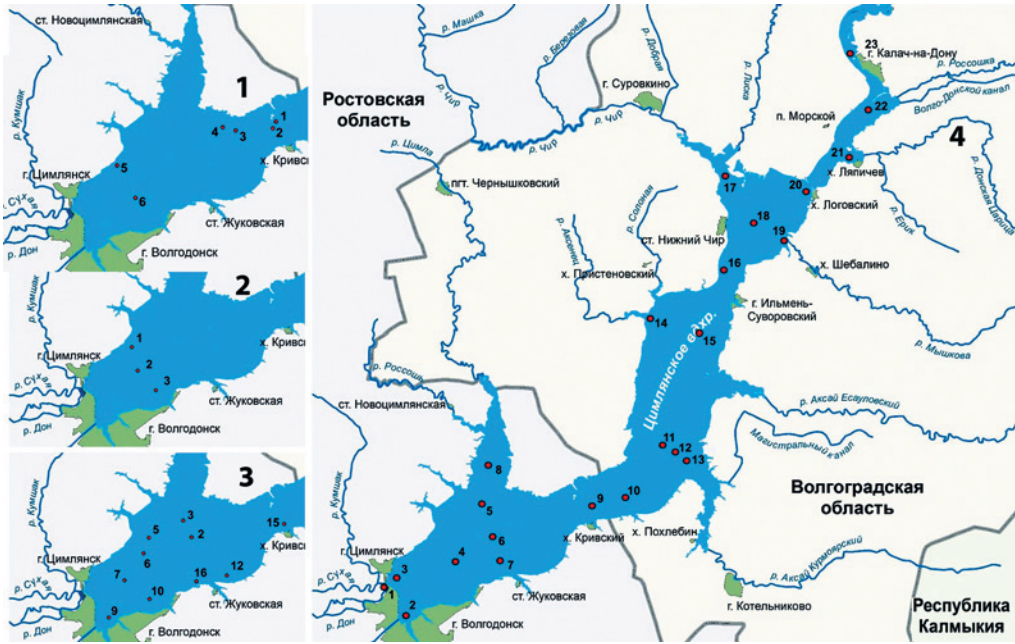


Рис. 1. Схема расположения станций измерений: 9–10 августа 2021 г. (1), 8 августа 2022 г. (2), 17–18 июля 2023 г. (3), 27 сентября – 1 октября 2023 г. (4).
Fig. 1. The scheme of the gauging stations location: August 9–10, 2021 (1), August 8, 2022 (2), July 17–18, 2023 (3), September 27–October 1, 2023 (4).

Пробы донных отложений отобраны в 2021–2022 гг. дночерпателем Экмана-Бэрджа, в 2023 г. – трубкой ГОИН. Определение содержания органического вещества (ОВ) в донных отложениях производили методом потерь при прокаливании². В период съемки 27 сентября – 1 октября 2023 г. проведен отбор проб на химические анализы таких показателей, как БПК, ХПК, цветность, ионы азота, фосфаты, органический углерод. Анализ проведен в лаборатории РосНИИВХ по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные съемки различались по погодным условиям и структуре водной толщи. Первая декада августа 2021 г. характеризовалась жаркой антициклонической погодой, во время съемки температура воздуха составляла 28–30,2 °С при практически штилевой погоде, атмосферное давление 1000,2–1004,2 Гпа. На глубоководных станциях 2, 3 и 5 (от 12 до 20 м) в придонных горизонтах наблюдались бескислородные условия, на станциях 3 и 5 разница температуры поверхностного и придонного слоев составила 5,7 и 7,2 °С соответственно. В 2022 г. в день измерений погода стояла менее жаркая (27,1–28,9 °С) и более ветреная (2–2,6 м/с), при давлении 1013,2 ГПа. Водная толща была менее стратифицирована, разница температуры поверхностного и придонного слоев не превышала 2,5 °С. В период измерений в июле 2023 г. был выражен внутрисуточный

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

ход температуры воды с перепадом 4,7–5,3 °С (19,6–27,7 °С) при скорости ветра 2–6 м/с, давление снижалось от 1011,3 до 1006,4 ГПа. При этом разница температуры поверхностного и придонного слоев не превышала 1,6 °С. В конце сентября 2023 г. она не превышала 1,8 °С. Зато разность содержания растворенного кислорода варьировала от 0 до 8,2 мг/л, наиболее низкая концентрация наблюдалась в придонных горизонтах на глубоководных станциях у плотины 3 и 4 (рис. 1, схема 4): 1 и 3,3 мг/л) и в средней части (10, 12, 13: 1.7, 2.7, 2,6 мг/л). В период экспедиционных наблюдений в сентябре температура воздуха изменялась в пределах 18–24,3 °С, скорость ветра 0–3,8 м/с, давление снижалось.

Описанные выше гидрометеорологические условия определили особенности содержания и эмиссии парниковых газов в атмосферу. Результаты их определения приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Содержание метана на различных горизонтах станций измерений при проведении съемок

Table 1. The methane content at various gauging stations' horizons during the surveys

Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л
9–10 августа 2021 г.			27 сентября – 1 октября 2023 г.					
1	0	16.6	2	0	1.1	1	0	5.6
1	2	12.2	2	8.5	1.88	1	4.5	5.1
2	0	0.6	3	0	1.15	13	0	1.1
2	12	59.7	3	24	10.9	13	10	2.4
3	0	4.7	4	0	0.56	14	0	546.6
3	11	6.3	4	17	9.6	14	2	870.8
3	13	698.2	5	0	0.51	15	0	2.7
3	18	1702	5	7	4.06	15	6.5	1.8
4	0	3.2	6	0	0.48	16	0	4.1
4	4	5.0	6	2	0.25	16	6	4.7
5	0	5.0	6	5	0.3	17	0	4.2
5	14	5.4	6	10	0.65	17	3	8.1
5	17	1215	7	0	0.72	18	0	3.6
5	20	2300	7	13.6	1.16	18	4.5	7.4
6	0	8.7	9	0	0.75	19	0	8.5
6	7	7.7	9	12.3	5.66	19	1.8	нд
8 августа 2022 г.			10	0	0.31	20	0	5.8
1	0	1.3	10	12	0.54	20	2.8	6.3
1	5	0.8	11	0	2.18	21	0	13.3

Продолжение таблицы 1

Станция	Н, м	СН ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	СН ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	СН ₄ , мкл/л
1	10	0.8	11	2	1.45	21	1.9	21.4
1	15	6.3	11	5	0.92	22	0	14.4
2	0	0.9	11	9.5	1.59	22	2	11.2
2	5	1.0	12	0	0.61	23	0	4.9
2	13	6.5	12	10	0.72	23	5.6	12.0
3	0	4.0			<i>Примечание: 17–18 июля 2023 г. по техническим причинам производили измерение только удельного потока метана</i>			
3	2	3.8						
3	7	5.3						

Донные отложения в Цимлянском водохранилище распределены неоднородно. В русловой ложбине преобладают тонкодисперсные илы с большим содержанием органического вещества оливкового или черного цвета. На затопленной пойме распространены отложения, содержащие преимущественно раковины моллюсков с небольшой долей ила. В окрестностях абразионных берегов – много опесчаненных илов. Мощные илистые отложения выявлены ниже ответвления Донского магистрального канала. Ниже впадения р. Солоняя у правого берега грунт очевидно загрязнен, поскольку имел неприятный запах.

Таблица 2. Удельный поток (УП) метана и характер донных отложений на станциях измерений в 2021–2023 гг.

Table 2. The methane specific flow and the bottom sediments character at gauging stations in 2021-2023

Станция	Нст., м	УП СН ₄ , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП СН ₄ , мгС/м ² сут	Донные отложения
9–10 августа 2021 г.					27 сентября–1 октября 2023 г.			
1	2.5	13.4	нд	песок	1	4.5	10.6	верхний слой раковины, ниже раковины в плотном суглинке
2	12	46.5	26.1	оливко- вый ил	2	8.5	6.6	ил, темная колонка со светлым наилком с песком

Продолжение таблицы 2

Станция	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут	Донные отложения
3	18.5	94.1 (40.1–123.7)	29.9	черный ил	3	24	2.6	ил без наилка, плотный тем- но-коричневый
4	4	19.5	нд		4	17	1.3	глинистый ил
5	20	72.5	11.4	оливковый ил	5	7	1.7	песок
6	7.5	88.5 (47.6–129.40)	нд	раковины	6	10	0.6	песок
8 августа 2022 г.					7	13.6	0.2	темный ил, сверху свет- лый наилок с песком
1	15	2.4	нд	нд	9	12.3	0.3	грунт, ила почти нет
2	13	3	нд	нд	10	12	0	песок с жид- ким наилком
3	7	нд	нд	нд	11	9.7	5.4	раковины
17–18 июля 2023 г.					12	10	1	раковины
2	15.5	1.6	нд	нд	13	10	1.1	верхние 20 см ил олив- ковый, ниже суглинок
3	12	0.3	нд	нд	14	2	нд	темный мелко- дисперсный ил
5	17.2	1.3	нд	нд	15	6.9	4.3	заиленные раковины верхние 15 см, ниже грунт с растительны- ми остатками
6	16.9	4.9	нд	нд	16	4.8	2.9	заиленные раковины верхние 20 см, ниже плотный грунт

Продолжение таблицы 2

Станция	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут	Донные отложения
7	13.9	4	нд	нд	17	6	48.3	заиленные раковины верхние 20 см, ниже плотный грунт
9	5	2.5	нд	нд	18	3	3.1	верхний слой раковины, ниже черный плотный грунт
10	6.6	2.2	нд	нд	19	1.8	418.3	нд
12	14.9	0.64	нд	нд	20	2.8	8.3	грунт плотный, после моста возможен смыл ила из-за сужения потока
15	13.2	0.28	нд	нд	21	1.9	11.3	грунт илистый с песчаной примесью, серый с черным
16	12.1	15.4 (3.4–35.6)	нд	нд	22	2	466	светлый жидкий ил верхние 10 см, ниже уплотненный, внизу колонки черный
В 2023 г. определение ОВ% методом ППП не производилось; при больших различиях измеренного потока на станции камерами дополнительно приведены его максимальные и минимальные значения					23	5,6	74	ил

Примечание: нд – нет данных; Нст. – глубина станции.

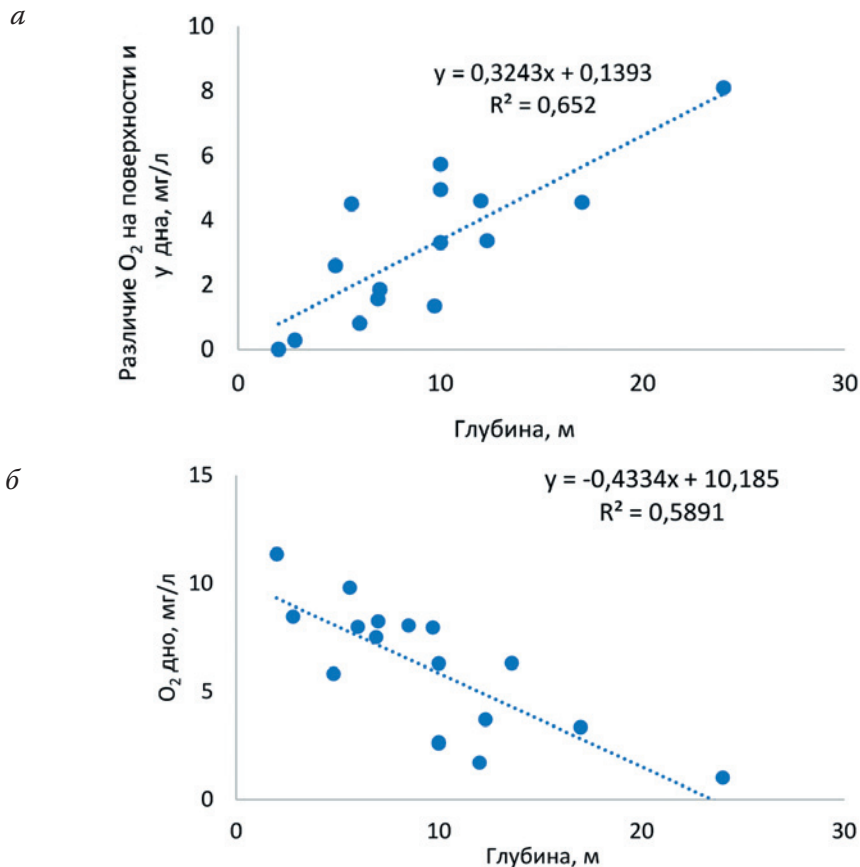


Рис. 2. Связь глубины станции и содержания растворенного кислорода в поверхностном и придонном слоях (а); глубины и содержания растворенного кислорода в придонном слое (б).

Fig. 2. Connection between the station depth and dissolved oxygen content in surface and near-bottom layers (a); depths and dissolved oxygen content in the near-bottom layer (b).

Анализ наиболее многочисленных измерений в сентябре 2023 г. показал, что наблюдается довольно тесная связь глубины станции и разницы содержания кислорода в поверхностном и придонном слоях (рис. 2а). Связано это, главным образом, со снижением содержания кислорода у дна на наиболее глубоких станциях. Из анализа исключили данные по станциям 2 и 7, где наблюдался апвеллинг, а также приустьевые заливы Донской Царицы, Мышковы и Чира, где условия формирования донных отложений и стратификации отличаются от условий основной акватории из-за влияния впадающих притоков.

Распределение растворенного кислорода – один из ключевых факторов, определяющих содержание и эмиссию метана, поскольку при его дефиците окисление происходит менее активно. В поверхностном слое его содержание зависит от процессов фотосинтеза и динамического перемешивания. Минимальные значения растворенного кислорода зафиксированы на станциях 7

(из-за сгона) и 9, 10 и 13 в утренние часы, а также в нижнем бьефе, куда сбрасывается вода из глубинных горизонтов. Содержание кислорода в придонном горизонте обусловлено процессами деструкции в придонной воде и грунтах, а также связано с антропогенной нагрузкой.

Содержание метана в водной толще в значительной степени определяется распределением растворенного кислорода. Анализ вертикального распределения метана показывает, что наибольшее его содержание на большинстве станций характерно для придонного горизонта. Незначительное превышение в поверхностном слое на некоторых станциях может быть обусловлено активной деструкцией органических веществ, наличием антропогенного загрязнения (ниже г. Калач-на-Дону) и активным пузырьковым потоком метана. Разность содержания метана на поверхности и у дна в целом увеличивается с глубиной из-за наличия дефицита кислорода, но эта связь имеет низкий коэффициент корреляции из-за множества причин, определяющих содержание метана в воде.

Наибольшие концентрации метана выявлены в 2021 г. при распространении верхней границы бескислородной зоны на глубоководных станциях до горизонтов 12–15 м. Подобные условия в другие годы отсутствовали, но при снижении содержания кислорода на станции 3 до 1 мг/л в придонном горизонте концентрация метана достигла 10,9 мкл/л. Повышенное содержание метана выявлено в верховьях водохранилища: выше г. Калач-на-Дону, ниже Донского магистрального канала и в приустьевом заливе р. Донская Царица. Эти участки характеризовались наличием темного тонкодисперсного ила, первая станция расположена в зоне выклинивания подпора с аккумуляцией наносов, последние две могут испытывать загрязнение от селитебной территории. На остальной акватории водохранилища в период съемок 2022–2023 гг. концентрация метана не превышала 10 мкл/л. Повышенная концентрация на станции 14 обусловлена дефицитом кислорода на этом участке даже в поверхностных слоях. Источник загрязнения на станции напрямую не выявлен, но был зафиксирован сильный запах навоза на прибрежной территории.

На большей части станций осредненный удельный поток метана не превышал 15 мгС/м²сут за исключением съемки в 2021 г. В приустьевых заливах, где аккумулируются приносимые притоками взвешенные вещества и где затруднен водообмен из-за наличия зарослей макрофитов, удельный поток существенно выше: в среднем до 418,3 мгС/м²сут возле устья р. Мышкова, в менее заросшем заливе р. Чир – 48,3 мгС/м²сут, а в хорошо аэрированном заливе р. Донская Царица удельный поток был наименьший – 11,3 мгС/м²сут. Высокое значение удельного потока выявлено на станции 25 в зоне выклинивания подпора и аккумуляции донных отложений (74,0 мгС/м²сут). Наибольший поток в сентябре 2023 г. был характерен для станции 22 (в среднем 466 мгС/м²сут), что может быть связано не только с аккумуляцией донных отложений, но и с влиянием сточных вод г. Калач-на-Дону.

В период выраженной стратификации летом 2021 г. в приплотинном районе водохранилища наблюдались значения удельного потока метана на 1–2 порядка больше, чем в остальные съемки (88 против 1,3–5 мгС/м²сут), что говорит

о большой временной изменчивости потока и значимой роли синоптических условий и проточности водоема, которые определяют характер стратификации. В качестве иллюстрации различий гидрологической структуры на рис. 3 приведено вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода во время съемок 9–10 августа 2021 г. и 27 сентября–1 октября 2023 г. Выбраны пары станций, находящиеся относительно близко друг от друга (рис. 1). Очевидно, что на станциях в середине приплотинного района с наибольшей длиной разгона ветра слой скачка наиболее заглублен (15–16 м против 10–12 на верхней границе района). В 2021 г. даже на мелководной станции выражено уменьшение содержания растворенного кислорода ко дну. Данная иллюстрация показывает, что значительная концентрация метана в придонном слое воды (табл. 1) возможна при наличии бескислородной зоны мощностью несколько метров, как это установлено по съемкам 2021 г.

В работе [21] проанализированы условия возникновения дефицита кислорода в Цимлянском водохранилище. Необходимое условие формирования гипоксии – замедление вертикального обмена. Отмечено, что по данным метеостанции Цимлянск среднегодовая повторяемость штилевой погоды за период 1966–2018 г. выросла с 28 до 43 %, а максимальная повторяемость штиля приходится на летние месяцы. Это означает, что в последнее время выросло число случаев с высокими значениями удельного потока метана, как в период съемки 2021 г.

Следует отметить, что в период исследований 2021 г. атмосферное давление было наименьшим, что также способствовало увеличению потока мета-

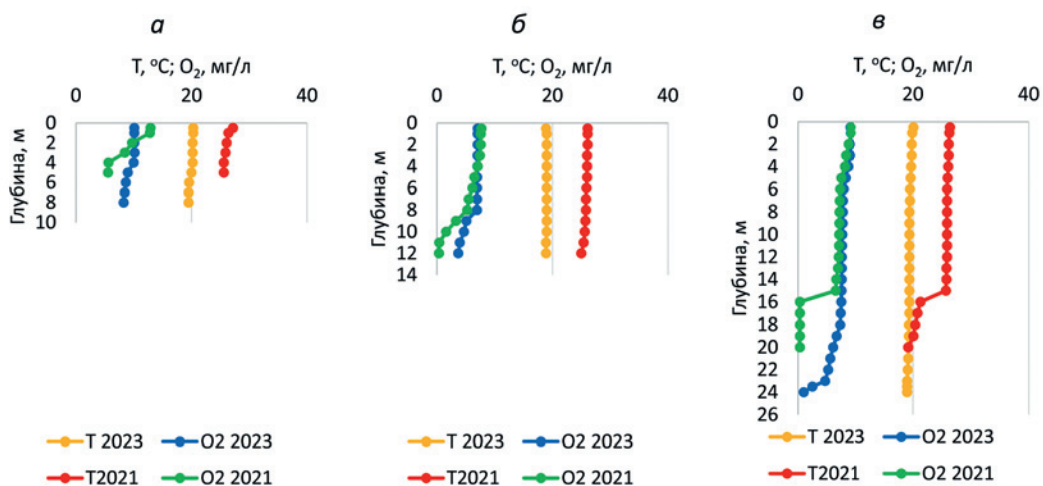


Рис. 3. Распределение температуры воды и растворенного кислорода 9–10 августа 2021 г. и 27 сентября–1 октября 2023 г. на близко расположенных станциях: *а* – 4 и 5; *б* – 2 и 9; *в* – станции 5 и 3.

Fig. 3. Distribution of water temperature and dissolved oxygen, August 9-10, 2021 b September 27 – October, 2023 at the closely situated stations: *a* – 4 and 5; *б* – 2 and 9; *в* – stations 5 and 3.

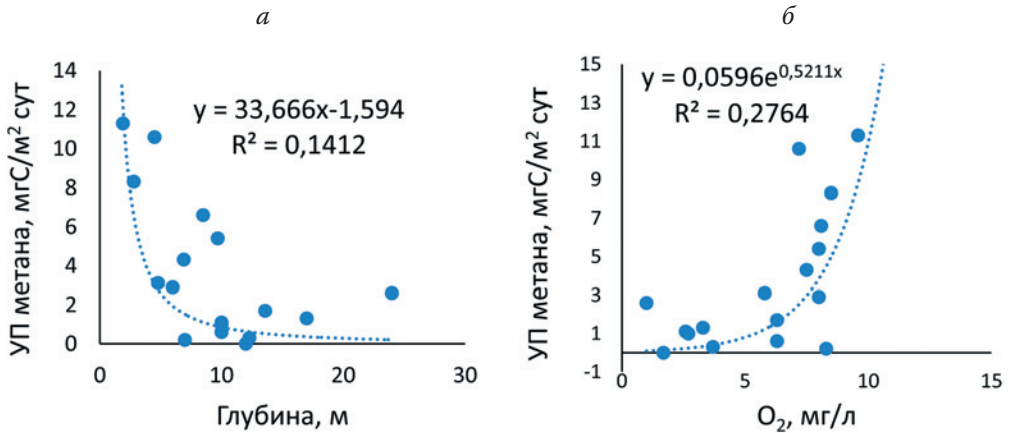


Рис. 4. Связь удельного потока метана с глубиной станции (а) и содержанием растворенного кислорода в придонном слое (б) по данным съемки в сентябре 2023 г.
 Fig. 4. Connection of the methane specific flow with the station depth (а) and the dissolved oxygen content in the near-bottom layer (б) according to the survey data in September, 2023.

на по сравнению с другими съемками, что демонстрирует пример сравнения данных станций в приплотинном районе: станции 5 и 6 на рис. 1 (1); станции 1–3 на рис. 1 (2); станции 6, 7, 10 на рис. 1 (3) и 4–7 на рис. 1 (4).

На рис. 4 показана связь удельного потока метана с глубиной станции и содержанием растворенного кислорода в придонном слое по данным съемки в сентябре 2023 г. Из массива исключены станции с максимальными значениями потока из-за нарушения однородности условий генерации метана (мелководные заливы, в которых происходит аккумуляция принесенных взвешенных веществ небольшими притоками, а также аккумуляция отмирающей массы макрофитов), по этой же причине не рассматривались одновременно данные всех съемок (различия стратификации).

Выявлена положительная связь содержания кислорода у дна и удельного потока метана (рис. 4б). Это, казалось бы, противоречит тому, что метан преобладает в анаэробной среде. Дело в том, что большое значение для удельного потока имеет такой фактор, как глубина станции. Пузырьки и молекулы метана преодолевают большее расстояние до поверхности воды у глубоководных станций. При этом происходит частичное окисление метана, что снижает значения удельного потока, несмотря на его более значительное содержание в придонных горизонтах в бескислородных условиях. Этот факт иллюстрирует рис. 4а. Данные зависимости имеют низкий коэффициент корреляции из-за многофакторности, определяющей величину удельного потока, однако иллюстрируют основные закономерности.

Следует отметить и такую закономерность, – чем больше удельный поток метана, тем больше его изменчивость из-за пузырьковой составляющей (рис. 5). Измеренные большие значения удельного потока были относительно близки на единственной станции 22 в вечернее время при штилевой погоде.

Газирующие грунты при малой глубине (2 м) давали устойчивый поток, который мало окислялся. Исследования на других станциях выполнялись при волнении 1–2 балла. Большая глубина, насыщение кислородом верхнего слоя водной толщи могли способствовать дифференциации пузырькового потока. Поэтому крайне важно производить измерения несколькими камерами или выполнять несколько повторностей экспозиции.

При соотнесении полученных данных по эмиссии и содержанию метана с результатами гидрохимического анализа следует отметить следующее. Повышенные значения потока и концентрации метана приурочены к приустьевым заливам рек Мышковы, Чира, в меньшей степени к р. Донская Царица, а также к верховьям водохранилища. Для этих участков характерны повышенные значения цветности воды, БПК. В целом эти показатели уменьшаются от верховьев к плотине (цветность от 50 до 25 град., БПК от 6,4–6,9 до 2,5–3), что указывает на процессы самоочищения воды водохранилища и разбавления поступающих с притоками загрязнений при смешении с основной водной массой. В нижнем районе следует отметить повышенные значения ХПК и БПК на станции 5 напротив залива, что может быть обусловлено поступлением загрязнений с водосборов рек Россошь и Цимла. ХПК имеет повышенные значения на станциях 5, 6, 7, 10, 14 и 21 и с характерными значениями содержания и потока метана не соотносится. Содержание растворенного органического углерода ($C_{орг}$) изменяется в водоеме в пределах 4,8–11,7 мг/л с минимумом в придонных слоях приплотинного района и максимумом у поверхности на

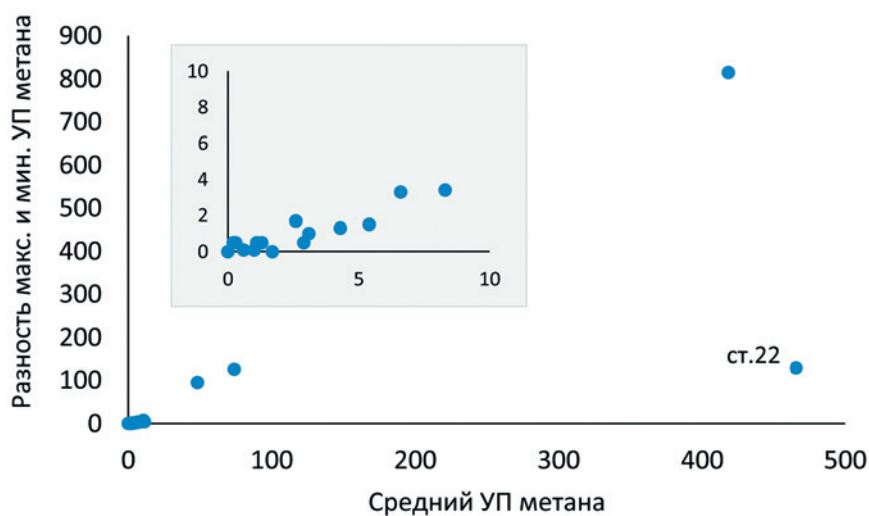


Рис. 5. Связь значений средней величины удельного потока метана и разности его минимальных и максимальных значений, мгС/м²сут. Врезка иллюстрирует зависимость при малых значениях потока.

Fig. 5. Connection between the methane specific flow average value and the difference of its minimal and maximal values, mgC/m²day. The inset illustrates the dependence with low values of the flow.

станциях 5, 6, 15 и 16. Повышенное содержание $C_{\text{орг}}$ выявлено в приустьевых заливах рек Донская Царица и Мышкова (10,5–11,8 мг/л), а максимальное – на станции 14 (11,3–15,1 мг/л). Статистически значимая связь содержания метана в воде и $C_{\text{орг}}$ отсутствует. Это обусловлено тем, что содержание метана в пределах одного водоема зависит от множества факторов, которые весьма разнородны: глубина станции, содержание кислорода в придонной воде, толщина бескислородной зоны, пересыщение кислородом верхних горизонтов, температура воды и грунтов, атмосферное давление.

Данные химических анализов подтвердили критическое состояние участка в районе станции 14, где выявлено наибольшее содержание метана и близкие к бескислородным условия. На этой станции установлено значительное количество иона аммония, что свидетельствует о фекальном загрязнении, содержание фосфатов превышает уровни на других станциях на порядок, зафиксировано максимальное значение ХПК и цветности.

Таблица 3. Средние значения удельного потока метана для морфологических районов за периоды съемок, мгС/м²сут

Table 3. Average values of the methane specific flow for morphologic areas over the surveys period, mgC/m²day

Район		9–10 августа 2021 г.	8 августа 2022 г.	17–18 июля 2023 г.	27 сентября–1 октября 2023 г.
х. Кривский – плотина	Станции	5.6	1, 2, 3	2–14	2–7
	УП	68.7	2.7	2.18	2.2
устье Аксай К. – х. Кривский	Станции	1, 2, 3, 4		15	9, 10
	УП	30.0		0.28	0.15
г. Ильмень Суворовский – устье Аксай Курмоярский	Станции				11–15
	УП				3.0
х. Логовской – г. Ильмень Суворовский	Станции				16–18, 20
	УП				15.7
Выше х. Логовской	Станции				22, 23
	УП				270
Приустьевые заливы	Станции			16	17, 19, 21
	УП			15,4	159.2

В заключении работы было проведено сопоставление полученных данных с характерными значениями удельного потока метана для водохранилищ уме-

ренной зоны, приведенными в работе Johnson M. S. et al. [7]. Рассчитанные с учетом обобщенных фактических наблюдений и климатических показателей среднемесячные значения диффузионного и пузырькового потока для июля, августа и сентября составили 10,5; 9,0; 6,8 и 180; 173 и 120 мгС/м²сут [7]. Как следует из данных табл. 3, фактически измеренные значения удельного потока метана, осредненные по морфологическим районам Цимлянского водохранилища на основной акватории меньше на 1–2 порядка и только в верховьях и приустьевых заливах имеют такую же величину. Это еще одно доказательство, что вопрос изучения эмиссии метана из водохранилищ все еще открыт и требует систематизации продолжительных по наблюдениям массивов данных для адекватной глобальной оценки.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования выявлена значительная неоднородность содержания и удельного потока метана в Цимлянском водохранилище. Их значения обусловлены химическим составом воды, характером донных отложений, глубиной станции, содержанием растворенного кислорода, поступлением водных масс притоков и даже атмосферным давлением. Определена «горячая точка» водоема возле с. Попов с катастрофической ситуацией по загрязнению воды.

Установлено, что фотосинтез в поверхностном слое и хорошее перемешивание, способствующие аэрации воды, сокращают поток метана из донных отложений при окислении. На большинстве станций в 2022–2023 гг. 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, богатых органическим веществом донных отложений. Дополнительный фактор, увеличивающий генерацию и выход метана, – антропогенное загрязнение.

На станциях с заиленным песком и ракушечником удельный поток метана относительно невелик. Станции в приустьевых заливах и на основной акватории нельзя рассматривать как однородные, поскольку имеет место отличие гидрологического и гидрохимического режимов (например, повышенное содержание органического углерода на станциях в заливах, различные условия осадконакопления).

Выявленная значительная пространственная неоднородность удельного потока метана на акватории Цимлянского водохранилища подтверждает необходимость продолжения исследования формирования газового режима водоема посредством проведения съемок, поскольку непрерывные измерения на одной станции по методике, разработанной для наземных карбоновых полигонов, нерепрезентативны в масштабе всего водоема. В то же время изменения гидрологической структуры под влиянием внешних условий (погода, проточность) требуют проведения регулярных измерений, что весьма трудно-

затратно. Поэтому оптимальным решением может быть постоянный мониторинг на нескольких репрезентативных станциях по длине водоема в сочетании с периодическими подробными съемками.

По предварительным данным последней подробной съемки мониторинговыми станциями следует назначить станции 5, 9, 15, 18, 22 и 23, где удельный поток метана близок к среднему, а также станции в приустьевых заливах – 14, 17, 19, 21. Для подтверждения выбора желательно произвести еще 2–3 подробные съемки при различных гидрологических условиях (уровень воды, стратификация).

Благодарности. Авторы благодарят Я.В. Куликову за помощь в проведении полевых работ в июле 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. St. Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *Bioscience* 50, 2000. P. 766–775.
2. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. DOI: 10.1038/444524a.
3. 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. DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
4. Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs in: *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Water Resources Development and Management / edited by Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A., Springer, Berlin, Heidelberg. P. 69–94. DOI: 10.1007/978-3-642-23571-9_4, 2012.
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // *Environmental science and pollution research international*. 2014. Vol. 21. P. 131–137.
6. Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // *BioScience*. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
7. Johnson M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. DOI: 10.1029/2021JG006305.
8. Елистратов В.В. и др. Исследования эмиссии парниковых газов с водохранилищ ГЭС России // *Гидротехническое строительство*. 2014. № 11. С. 52–58.
9. Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2019. № 2. С. 58–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-5.
10. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. *Impact of large dams: A Global Assessment* // Berlin: Water Resources Development and Management. 2012. 410 p.
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // *Washington: Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 1. P. 1–11.
12. Stepanenko V. et al. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *EGU: Geoscientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 977–2006.
13. Степаненко В. М. Математическое моделирование теплового режима и динамики парниковых газов в водоемах суши: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2018. 361 с.
14. Репина И.А., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // *Известия Российской академии наук. Сер. геогр.*, 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. DOI: 10.31857/S2587556623060080.
15. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов // *Микробиология*. 2015. Т. 84. № 6. С. 732–742. DOI: 10.7868/S0026365615060130.

16. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в условиях цветения синезеленых микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. 2013. № 1(6). С. 23–28.
17. 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.
18. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Оценка экологического состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 116–122.
19. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biochemical Cycles*. 2004. 18. DOI:10.1029/2004GB002238.
20. 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.
21. Кульгин В.В. Анализ условий возникновения зон дефицита кислорода в Цимлянском водохранилище // *Экология. Экономика. Информатика*. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2019. Т.1. № 4. С. 180–185.

REFERENCES

1. St.Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 50. 2000. P. 766–775.
2. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. DOI: 10.1038/444524a.
3. 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. DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
4. Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T.: Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs in: Impacts of Large Dams: A Global Assessment. *Water Resources Development and Management*, edited by Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A., Berlin, Heidelberg. P. 69–94. DOI: 10.1007/978-3-642-23571-9_4, 2012.
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environmental science and pollution research international*. 2014. Vol. 21. P. 131–137.
6. Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
7. Johnson M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. DOI: 10.1029/2021JG006305.
8. Elistratov V.V. et al. Studies of the greenhouse gases emission from reservoirs of Russian thermal power plants. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydro/engineering construction]*. 2014. No. 11. P. 52–58 [In Russ.].
9. Grechushnikova M.G., Shkolniy D.I. Assessment of the methane emission from Russian reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. № 2. P. 58–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-5 [In Russ.].
10. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment. *Berlin: Water Resources Development and Management*. 2012. 410 p.
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. *Washington: Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 1. P. 1–11.
12. Stepanenko V. et al. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geo/scientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 977–2006.
13. Stepanenko V.M. Mathematic simulating of the greenhouse gases thermal regime and dynamics in land water bodies: avtoref. dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk. Moscow, 2018. 361 p. [In Russ.].
14. Repina I.A., Grechushnikova M.G., Frolova N.L. et al. The methane content and flows in the Volga reservoirs. *Izvestia Rossiyskoy akademii nauk [Newsletter of the Russian Academy of Sciences]. Series: Geography*, 2023. Vol. 87. No. 6. P. 899–913. DOI: 10.31857/S2587556623060080 [In Russ.].

15. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh Y.V. Analysis of the Tsimlyansk reservoir (Russia) phytoplankton for presence of cyanobacterial hepato- and neuro- toxins. *Microbiology*. 2015. Vol. 84. No. 6. P. 732–742. DOI: 10.7868/S0026365615060130 [In Russ.].
16. Bakaeva E.N., Ignatova N.A. Water quality of the near-dam part of the Tsimlyansk reservoir in the conditions of blue-green micro/algae “blooming”. *Global nuclear safety*. 2013. No. 1(6). P. 23–28 [In Russ.].
17. Loboyko V.F., Zubov I.A. The role of environmental factors and anthropogenic impact in formation of the current ecosystem of the Tsimlyansk reservoir. *Newsletter of the Lower Volga Agrarian/ university center*. 2009. No. 2(14). P. 26–32 [In Russ.].
18. Khoruzhaya T.A., Minina L.I. Assessment of ecological status of the Tsimlyansk, Proletarsky and Veselovsky reservoirs. *Meteorology and hydrology*. 2017. No. 5. P. 116–122 [In Russ.].
19. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. 18. DOI:10.1029/2004GB002238 [In Russ.].
20. 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.
21. Kulygin V.V. Analysis of conditions for appearance of the oxygen deficit zones in the Tsimlyansk reservoir. *Ecology. Economics*. IT. Series: System analysis and simulating of economic and ecological systems. 2019. Vol. 1. No. 4. P. 180–185 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Гречушникова Мария Георгиевна, канд. геогр. наук, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, Москва, ул. Губкина д. 3; географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Репина Ирина Анатольевна, д-р физ.-мат. наук, ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3; Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, ORCID: 0000-0001-7341-0826, e-mail: repina@ifaran.ru

Казанцев Владимир Сергеевич, канд. биол. наук, ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3; ORCID: 0000-0002-0156-0566; e-mail: kazantsev@ifaran.ru

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

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Россия, 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, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

About the authors:

Maria G. Grechushnikova, Candidate of Geographic Sciences, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, ul. Gubkina, 3, Moscow, Russia; M.V. Lomonosov Moscow University Geographical Department; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Irina A. Repina, Doctor of Physical/mathematical Sciences, Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Pyzhevsky per., 3, M.V. Lomonosov Moscow University Research Computation Center, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0001-7341-0826, e-mail: repina@ifaran.ru

Vladimir S. Kazantsev, Candidate of Biologic Sciences, Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Pyzhevsky per., 3, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-0156-0566; e-mail: kazantsev@ifaran.ru

Elena V. Usova, Head, Department of water quality studies and analytical activity, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, Russia; ORCID 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Eugenia L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 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, Russia; ORCID 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com