



УДК 504.455+504.064.36:574
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.3>

Результаты натуральных измерений потока метана с разнотипных водохранилищ

М. Г. Гречушникова, И. А. Репина*

*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва, Россия
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Д. В. Ломова

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

В. А. Ломов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты измерений удельного потока метана с поверхности разнотипных водохранилищ (Иваньковского, Цимлянского и Чиркейского), проведенных в августе 2021 г. Выбранные водохранилища различаются проточностью, климатическими особенностями, антропогенной нагрузкой. Выявлены основные факторы, влияющие на значение удельного потока метана с поверхности водохранилищ. Произведена оценка эмиссии с поверхности каждого водоема. Установлено, что, несмотря на наибольшую величину удельного потока метана, зафиксированного на Иваньковском водохранилище, вклад этого водохранилища в эмиссию в 43 раза меньше, чем Цимлянского, из-за меньшей площади. Сравнительно ничтожная по абсолютной величине эмиссия метана выявлена для Чиркейского водохранилища, притом что мощность Чиркейской ГЭС в 4,7 раза больше мощности Цимлянской ГЭС и в 33,3 раза больше мощности Иваньковской ГЭС. Сделан вывод, что при применении эмпирических зависимостей или метода аналогии для оценки эмиссии с неизученных водохранилищ крайне важно учитывать не только климатическую зону, в которой расположен водоем, и его собственные характеристики, но и условия формирования стока на водосборе и его ландшафтные особенности.

Ключевые слова: метан, растворенный кислород, первичная продукция, донные отложения.

Благодарности: Авторы благодарят коллектив Конаковской НИС ИВП РАН за содействие в проведении экспедиционных исследований. Исследования проведены в рамках договора с ПАО «Русгидро» 1010-416-2021.

Для цитирования: Результаты натуральных измерений потока метана с разнотипных водохранилищ / М. Г. Гречушникова, И. А. Репина, Д. В. Ломова, В. А. Ломов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 3–13. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.3>

The Results of Field Measurements of Methane Flux from Various Reservoirs

M. G. Grechushnikova, I. A. Repina*

*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russian Federation
M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

D. V. Lomova

Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russian Federation

V. A. Lomov

M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of measurements of the specific flux of methane from the surface of different types of reservoirs on the ETR in August 2021. The selected reservoirs (Ivankovskoye, Tsimlyanskoye and Chirkeynskoye) differ in flow rate, climatic features, and anthropogenic load. The main factors of differences in the specific flux of methane from the surface of water reservoirs, which amounted to 10.5–334, 13–183, 0–1,3 mgC/(m²•day) respectively for the Ivankovskoe, Tsimlyanskoe and Chirkeynskoe reservoirs, were revealed. Spatial differences in methane content and emissions are determined by the nature of the bottom sediments, the depth of the station, the productivity of the reservoir, the presence of stratification and oxygen-free conditions in the bottom layer. The emission from the surface of each reservoir was estimated. Despite the fact that the largest specific flux was measured at the Ivankovskoe reservoir, its contribution to atmospheric emissions is 43 times less than that of the Tsimlyanskoe reservoir due to its smaller area. A relatively insignificant methane emission in absolute magnitude was detected for the Chirkeynskoye reservoir, despite the fact that the capacity of Chirkeynskaya HPP is 4.7 times greater than the Tsimlyanskaya HPP and 33.3 times greater than the Ivankovskaya HPP. When estimating global methane emissions, when using empirical dependencies or the analogy method to estimate emissions from unexplored reservoirs, it is extremely important to take into account not only the climatic zone in which the reservoir is located and its own characteristics, but also the conditions for the formation of runoff in the catchment and its landscape features.

Keywords: methane, dissolved oxygen, primary production, bottom sediments.

For citation: Grechushnikova M.G., Repina I.A., Lomova D.V., Lomov V.A. The Results of Field Measurements of Methane Flux from Various Reservoirs. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 40, pp. 3–13. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.3> (in Russian)

Введение

Метан биогенным путем образуется в донных отложениях водоемов в результате жизнедеятельности микроорганизмов, которые разлагают органическое вещество в условиях отсутствия кислорода [Метан в водных ... , 2005]. Выделение в атмосферу продуктов разложения органического вещества в донных отложениях искусственных водоемов является одним из видов антропогенного вклада в увеличение содержания парниковых газов в атмосфере. Изучение и количественная оценка этого вклада представляется весьма актуальной.

В работе [Greenhouse Gas Emissions ... , 2016] содержатся сведения об удельном потоке метана с разнотипных водохранилищ мира. Однако, как показал анализ указанных в ней первоисточников, имеющиеся данные зачастую являются результатами единичных съемок, а не регулярного монито-

ринга. В ходе исследования авторами потока метана на Можайском водохранилище установлена значительная пространственно-временная изменчивость его величины (0,1–20 мгС/(м²·сут)). При этом наибольшее значение удельного потока эмиссии метана (более 15 мгС/(м²·сут)) отмечалось в период перед разрушением прямой стратификации (в конце августа – в сентябре), когда из-за продолжительное время сохраняющихся бескислородных условий, большой продуктивности и повышения температуры придонной воды к концу лета образование метана было наиболее интенсивным и его концентрация в придонном слое достигала нескольких тысяч мкл/л. Удельный поток метана не только изменяется по длине водоема, но и значительно зависит от гидрологической структуры слабопроточного водоема в каждом году, что определяется метеорологическими условиями года [Methane fluxes in ... , 2020].

В России вопрос эмиссии метана с поверхности водохранилищ изучен сравнительно слабо. Актуальность настоящей работы обусловлена немногочисленностью натуральных измерений потока метана с поверхности искусственных водоемов и задачами параметризации этого процесса в глобальном масштабе. Сопоставление результатов выполненных оценок эмиссии на основании обобщения натуральных данных из [Deemer, Holgerson, 2021] с данными по новым изученным объектам показало, что классификация и осреднение удельного потока метана с водоемов по природным зонам не являются перспективными. Более детальный анализ базы данных из [Greenhouse Gas Emissions ... , 2016] и классификация удельного потока с учетом не только природной зоны, но и проточности, трофического статуса и средней глубины водоема [Гречушникова, Школьный, 2019] дает результаты, более близкие к результатам натуральных измерений. Значение трофности и возраста водоема рассмотрено в [Greenhouse Gas Emissions ... , 2005], а уровня воды – в [Reservoir Water-Level ... , 2016].

Рекомендации по ежемесячным измерениям для точной оценки потока метана зачастую нереальны к исполнению, поэтому в руководстве [Straskraba, Tundisi, 1999] указано минимальное количество измерительных кампаний – 4 в год. Настоящая работа посвящена сравнению результатов изучения содержания и эмиссии метана разнотипных водохранилищ на основе полевых данных, полученных в августе 2021 г. Эти результаты нельзя рассматривать как оценку характерных годовых значений потока метана, поскольку исследования проведены лишь в одну из фаз гидрологического режима, но выполненные работы имеют ценность именно для сравнения эмиссии метана с разнотипных водохранилищ и для выявления значимых факторов исследуемого процесса.

Объекты и методы исследования

Иваньковское водохранилище создано в 1937 г., его среднегодовой коэффициент водообмена (Кв) 7,9 год⁻¹. Водоем используется для подачи воды в столицу по каналу имени Москвы (в среднем 1,5 км³/год), для охлаждения систем Конаковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению, а также для судоходства, добычи строительного материа-

ла, рекреационных целей и т. д. Водохранилище относится к водохранилищам долинного типа и имеет сложную конфигурацию. Полный объем при НПУ – 1120 млн м³, полезный – 813 млн м³, площадь водного зеркала при НПУ – 327 км², длина – 134 км, средняя глубина – 3,4 м, максимальная (у плотины) – 19 м. Мощность Ивановской ГЭС – 30 МВт. Морфологические особенности плесов водохранилища обуславливают их эколого-биологические различия [Никаноров, 1975].

Цимлянское водохранилище – один из крупнейших искусственных водоемов юга России, созданный в 1952 г. в нижней части бассейна р. Дон, осуществляет многолетнее регулирование с Кв 4,8 год⁻¹ [Эдельштейн, 1998]. Его водохозяйственный комплекс включает в себя объекты питьевого, сельскохозяйственного и технического водоснабжения, атомной и гидроэнергетики (Цимлянской ГЭС и Ростовской АЭС), рекреационной сферы. Цимлянское водохранилище представляет собой водоем руслового типа, площадь водохранилища – 2700 км², объем – 23,7 км³, длина – 180 км, максимальная ширина – 30 км, средняя глубина – 8,8 м. Мощность Цимлянской ГЭС – 211,5 МВт. Летом Цимлянское водохранилище «цветет» из-за высокого содержания в воде азота и фосфора за счет сбросов органических стоков, применения на полях минеральных удобрений и притока с водосбора большой площади. Интенсивное размножение синезеленых водорослей приводит к накоплению в воде органических веществ, что в свою очередь приводит к расходованию кислорода и заморным явлениям.

Чиркейское котловинно-долинное водохранилище – крупнейшее в Дагестане из каскада водохранилищ на р. Сулак. Строительство плотины и заполнение водоема происходило в 1970–1974 гг. Площадь водной поверхности – 42,4 км², объем – 2,78 км³, полезный объем – 1,32 км³, наибольшая глубина – 220 м (в настоящее время водоем заилен, наибольшие глубины уменьшились до 120 м), изменение уровня при сработке от НПУ – 40 м, Кв – 7,9 год⁻¹. Мощность Чиркейской ГЭС – 1000 МВт. Грунтообразовательный процесс в водохранилище осуществляется в основном за счет размыва береговой линии. В придонном слое глубоководной части водохранилища сезонные колебания температуры воды прослеживаются слабо, их размах составляет всего 2,5 °С при средней температуре воды 7,2 °С. Термоклин разрушается в холодный период года, но водохранилище не замерзает. Чиркейское водохранилище по видовому составу биоты и количеству живых организмов относится к малопродуктивным (олиготрофным) водоемам [Вода России].

Гидролого-гидрохимические съемки водохранилищ были проведены в 2021 г.: 4–5 августа – на Ивановском, 9–10 августа – на Цимлянском и 25 августа – на Чиркейском. Для определения содержания растворенных газов в воде используется методика фазово-равновесной дегазации [Большаков, Егоров, 1995]. Методом парофазной экстракции выделенная газовая фаза переводилась для последующего анализа в стеклянные флаконы с насыщенным солевым раствором, выполняющим функцию консерванта [Methane

Emissions from ... , 2010]. Для лабораторных исследований¹ использовалось: объем пробы воды – 40 мл, воздуха – 20 мл, время встряхивания – 2–3 мин. Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором «Хроматэк-Кристалл 5000.2»². Расчет концентрации метана в пробах воды производился методом headspace. На станциях (рис. 1) осуществлялось измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер [Methane emissions from ... , 2004] и отбор проб для обработки указанным выше методом.

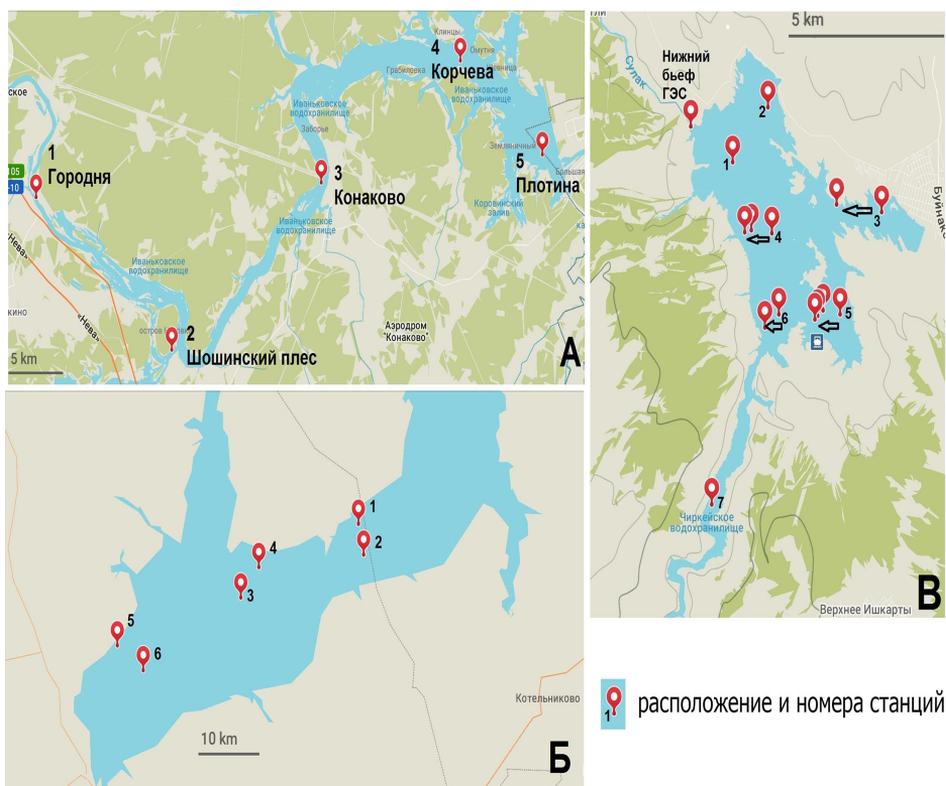


Рис. 1. Схема расположения и номера станций на акватории водохранилищ: А – Иваньковское, Б – Цимлянское, В – Чиркейское (стрелками показан дрейф судна)

Дополнительно производился отбор проб воды для определения интенсивности продукционно-деструкционных процессов скляночным методом в кислородной модификации [Винберг, 1960]. Светлая и темная склянки экспонировались в светлом баке на борту судна в течение 3–4 ч, величины валово-

¹ РД 52.24.512-2002. Методические указания. Методика выполнения измерений концентрации метана в водах парофазным газохроматографическим методом. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/265205/>

² РД 52.44.816-2015. Массовая концентрация метана и диоксида углерода в приземном слое атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии. URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/prikaz-rosgidrometa-ot-02-03-2016-%E2%84%96-77-o-vvedenii-v-dejstvie.html>

вой продукции и деструкции определялись в пересчете на 1 ч. На станциях осуществлялось зондирование водной толщи для определения вертикального профиля температуры, электропроводности и растворенного кислорода приборами YSI. Содержание органического вещества в грунтах дна определялось по потере веса при прокаливании³, за исключением Чиркейского водохранилища, где не удалось отобрать пробы грунта дночерпателем Экмана – Бэрджа. В табл. 1 приводятся данные о содержании органического вещества (ОВ) в донных отложениях для этого водоема, отобранных стратометром в ходе следующей экспедиции, состоявшейся 3 ноября 2021 г.

Результаты измерений

В августе 2021 г. во всех исследованных объектах наблюдалась прямая стратификация: в Ивановском водохранилище разность поверхностной и придонной температуры воды составила 1–2,7 °С (наибольшая разность фиксировалась в приплотинном районе, станции 4 и 5); в Цимлянском водохранилище – 0,7–7,2 °С (минимальные значения для мелководных станций 1 и 4, наибольшие – для глубоководных станций 3 и 5). В Чиркейском водохранилище отмечалось два слоя скачка: синоптический – на горизонтах 9–12 м с уменьшением температуры воды с 25–26 до 21 °С и сезонный – с уменьшением температуры воды с 18 до 11 °С. Ниже горизонта 60 м температура воды не превышала 10,7 °С. В Ивановском водохранилище содержание растворенного кислорода в поверхностном слое составило 9,5–10,7 мг/л, минимальное значение (2,5 мг/л) измерено в придонном слое на станции 4. В поверхностном слое Цимлянского водохранилища содержание растворенного кислорода достигало 9,2–12,9 мг/л, на глубоководных станциях 3 и 5 кислород отсутствовал ниже горизонтов 12 и 15 м соответственно. Содержание растворенного кислорода в поверхностном слое Чиркейского водохранилища было наиболее низким (8,4–8,9 мг/л), что связано с наименьшей продукционной активностью этого водоема. В придонных горизонтах бескислородные условия не зафиксированы, содержание кислорода было не менее 4,5 мг/л даже на самых глубоководных станциях (см. табл. 1).

Наибольшей продуктивностью в исследуемый период отличалось Цимлянское водохранилище (0,7–1,5 мгО₂/(л·ч)). На Ивановском водохранилище минимальные значения валовой продукции обнаружены в русловой части на станции 1 (0,17 мгО₂/(л·ч)), а максимальные на ст. 2 – мелководном Шошинском плесе (0,63 мгО₂/(л·ч)). В Чиркейском водохранилище величина валовой продукции составила 0,06 мгО₂/(л·ч), т. е. на 1–2 порядка меньше, чем в первых двух водоемах.

³ ГОСТ 27800-93 (ИСО 806-76). Глинозем. Метод определения потери массы при прокаливании // СПС «Гарант». URL: <https://base.garant.ru/5919676/>

Таблица 1

Результаты полевых измерений (расположение станций приведено на рис. 1);
d – гигроскопическая влажность грунта, *OB* – доля органического вещества в грунте

Станция	Горизонт, м	CH ₄ , мкл/л	Удельный поток, мгС/(м ² ·сут)	<i>d</i> , %	OB, %	O ₂ , мг/л
Иваньковское водохранилище, 5–6 августа 2021 г.						
1	0	4,7	10,5			9
1	10,4	4,6				3,9
2	0	10,8	334	5,5	12,3	10,5
2	9,5	17,2				3,5
3	0	9,9	31,9	7,2	15,9	10,4
3	13,5	16,0				2,9
4	0	7,8	223,8	6,5	14,5	10,7
4	14,5	68,5				2,5
5	0	14,1	68,9	8,0	17,1	9,5
5	17	132,3				6
Цимлянское водохранилище, 9–10 августа 2021 г.						
1	0	16,6	13–13,9			12
1	2	12,2				9,5
2	0	0,6	45,8–47,2	6	26,1	7,7
2	12	59,7				0,4
3	0	4,7	118,6–123,7	6,9	29,9	10,1
3	11	6,3				4,9
3	13	698				0,4
3	18	1702				0,3
4	0	3,2	16,6–22,3			12,9
4	4	5,0				5,9
5	0	5,0	68,1–76,9	2,8	11,4	9,2
5	14	5,40				6,7
5	17	1215				0,3
5	20	2300				0,3
6	0	8,7	63,3–183,3			10,3
6	7	7,7				7,6
Чиркейское водохранилище, 25 августа 2021 г.						
1	0	0,4	0–0,9			8,9
1	50	1,1				6,4
1	100	0,4		нд	нд	5,1
2	0	0,2	0			8,8
2	30	1,4		нд	нд	6,5
3	0	0,6	0–0,1			8,4
3	15	2,3				6,9
3	40	1,7		2,4	7,8	6,4
4	0	0,3	0–0,8			8,4
4	10	1,8				8,7
4	14	2,7				7,7
4	100	0,8		3,1	7,9	4,7
5	0	0,3	0,6–1,3			8,6
5	10	0,9				8,7
5	16	3,0				7,5
5	40	1,8		нд	нд	6,8
6	0	0,3	0,2–1,0			8,7
6	12	2,0				8,9
6	18	3,1		нд	нд	7,6
7	0	0,7	1,1–1,8			8,7
7	16	0,8				8,1
7	30	4,4		нд	нд	7,6

Наибольшим содержанием ОВ отличались грунты Цимлянского водохранилища (26–29 %) из-за его наибольшей продуктивности. На станции 5 снижение содержания ОВ может быть обусловлено близостью высокого берега и увеличением доли терригенного материала при его абразии. На мелководных станциях 2 и 4 грунт песчаный. Содержание ОВ в грунтах Ивановского водохранилища на станциях 2–5 составило 12–17 %, на станции 1 грунт песчаный.

Во всех трех водоемах наблюдалось увеличение содержания метана от поверхности к придонному слою. В Ивановском водохранилище у поверхности и у дна содержание метана возрастало от верховьев к плотине, достигая наибольших величин на станции 5 (14,1 и 132,3 мкл/л соответственно). В Цимлянском водохранилище в придонных слоях глубоководных станций содержание метана было больше на порядок (до 1700–2300 мкл/л), что обусловлено его меньшей проточностью и бескислородными условиями в гипоглимнионе, несмотря на то что придонная температура воды на глубоководных станциях ниже, чем в Ивановском водохранилище (19,2–20,6 и 21,5–22 °С соответственно). Минимальное содержание метана было характерно для Чиркейского водохранилища (не более 5 мкл/л), это детерминировано низкими значениями температуры воды придонного слоя, значительной глубиной и наличием растворенного кислорода.

Наибольшая величина удельного потока метана (более 300 мгС/(м²·сут)) зафиксирована на Ивановском водохранилище в относительно мелководном Шошинском плесе. На станциях 3–5 величина удельного потока меньше на порядок из-за большей глубины. Достаточно высокое значение потока на станции 4 может быть связано с наличием пятна цветения синезеленых водорослей. На Цимлянском водохранилище минимальные значения потока метана (13–22 мгС/(м²·сут)) характерны для мелководных станций с песчаным грунтом (станции 1 и 4). Для глубоководных станций величина потока составила порядка 60–180 мгС/(м²·сут). Условия и гидрологические характеристики на станциях 3 и 5 обладают существенным сходством, но из-за большей глубины станции 5 значение удельного потока метана здесь меньше.

Удельный поток метана с поверхности Чиркейского водохранилища не превысил 1,8 мгС/(м²·сут) (что соизмеримо с точностью метода). Столь низкие значения потока метана связаны с олиготрофным статусом водоема и большими темпами заиления минеральной взвесью, которая поступает с притоком с водосбора и при абразии берегов. Также стоит отметить, что выше водохранилища его правый приток зарегулирован и загрязнения от поселков в долине р. Аварское Койсу и ее притоков аккумулируются в каскадах водохранилищ, расположенных на этих водотоках. Река Андийское Койсу пока находится в естественном состоянии.

Для оценки и сравнения величины эмиссии метана с поверхности изученных водохранилищ по результатам наблюдений предложена следующая параметризация (табл. 2). С учетом батиграфических кривых водоемов наибольшая эмиссия характерна для Цимлянского водохранилища (270 274 кгС/сут) как из-за его наибольшей площади, так и в силу сравни-

тельно больших значений удельного потока. Выход метана из Ивановского водохранилища на 2 порядка меньше (6295 кгС/сут) из-за меньшей площади водоема. Эмиссия метана с Чиркейского водохранилища оценивается всего в 24 кгС/сут. Необходимо подчеркнуть, что данные значения относятся только к указанному выше периоду, в другие сезоны года удельный поток с Ивановского и Цимлянского водохранилищ может быть существенно меньше из-за низкой температуры воды и хорошей аэрации водной толщи. Например, по данным полевых работ, в апреле 2021 г. удельный поток в приплотинной части Цимлянского водохранилища не превышал 1,3 мгС/(м²·сут), а это значит, что в период весенней конвекции общая эмиссия с этого водоема не более 3500 кгС/сут.

Таблица 2

Параметризация удельного потока метана

Водохранилище	Горизонты, м	Удельный поток, мгС/(м ² ·сут)	Площадь, км ²	Эмиссия, кгС/сут	Эмиссия с водоема, кгС/сут
Ивановское	0–12	10,5	427,6	4490	6295
	12–15	32,0	10,4	334	
	15–20	210	7,0	1471	
Цимлянское	0–2	13,5	78,0	1053	270 274
	2–4	19,0	271	5149	
	4–18	120	1972	236 640	
	18–20	72,0	381	27 432	
Чиркейское	0–30	0,0	18,6	0	24
	30–125	1,0	24,0	24	

Выводы

Удельный поток метана имеет существенную пространственную неоднородность в пределах относительно неглубоких стратифицированных водохранилищ.

Наибольшие значения удельного потока метана в августе 2021 г. зафиксированы в эвтрофных водохранилищах. Так, наибольшие значения удельного потока метана (до 334 мгС/(м²·сут)) выявлены в мелководном (до 10 м) Шошинском плесе Ивановского водохранилища, на относительно мелководном участке затопленной поймы Цимлянского водохранилища (до 7 м, 63–183 мгС/(м²·сут)) и над русловой ложбиной с богатыми органическим веществом илами (18 м, 30 %, 119–124 мгС/(м²·сут)).

Наименьшие значения удельного потока метана отмечены в глубоководном горном олиготрофном Чиркейском водохранилище (0–1,8 мгС/(м²·сут)).

Список литературы

Большаков А. М., Егоров А. В. Результаты газометрических исследований в Карском море // Океанология. 1995. Т. 35, № 3. С. 399–404.

Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск : Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.

Вода России. Чиркейское водохранилище. URL: https://water-rf.ru/Водные_объекты/1300/Чиркейское_водохранилище (дата обращения: 21.09.2021).

Гречушников М. Г., Школьный Д. И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71.

Метан в водных экосистемах / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша, В. О. Хорошевская. Ростов-на-Дону : Копицентр, 2005. 329 с.

Никаноров Ю. И. Ивановское водохранилище // Известия ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.

Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М. : ГЕОС, 1998. 277 с.

Deemer B. R., Holgerson M. A. Drivers of methane flux differ between lakes and reservoirs, complicating global upscaling efforts // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. Vol. 126 (e2019JG005600). <https://doi.org/10.1029/2019JG005600>

Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments / A. Tremblay, C. Roehm, L. Varfalvy, M. Garneau. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 742 p.

Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis / B. Deemer, A. Harrison, S. Li, J. Beaulieu, T. Delsontro // Springer. *BioScience*. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964.

Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate / D. Bastviken, J. Cole, M. Pace, L. Tranvik // *Global Biochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. 12 p.

Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling / D.T. Bastviken [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44, N 14. P. 5450–5455.

Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling / V. A. Lomov, V. M. Stepanenko, M. G. Grechushnikova, I.A. Repina // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 611 (012029).

Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission / J. Harrison, B. Deemer, M. Birchfield, M. O'Malley // *Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 1. 11 p.

Straskraba M., Tundisi J.G. Reservoir Water Quality Management. UNEP/ILEC Guidelines of lake management. Japan : Int. Lake Environment Committee (ILEC). 1999. Vol. 9.

References

Bolshakov A.M., Egorov A.V. Rezultaty gazometricheskikh issledovaniy v Karskom more [Results of gas-metric investigations in Cara sea]. *Okeanologiya* [Oceanology], 1995, vol. 35, no. 3, pp. 399-404. (in Russian)

Vinberg G.G. *Pervichnaya produkcziya vodoemov* [Primary production of water bodies]. Minsk, AN BSSR Publ., 1960, 329 p. (in Russian)

Voda Rossii. Chirkeiskoe vodokhranilishche [Chirkeyskoe reservoir]. Available at: https://water-rf.ru/Водные_объекты/1300/Чиркейское_водохранилище (date of access: 21.09.2021). (in Russian)

Grechushnikova M.G., Shkolnyi D.I. Otsenka emissii metana vodokhranilishchami Rossii [Estimation of methane flux from Russian reservoirs]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management of Russia: problems, technologies, management], 2019, no. 2, pp. 58-71. (in Russian)

Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in water ecosystems]. Rostov-na-Donu, Kopisentr Publ., 2005, 329 p. (in Russian)

Nikanorov Yu.I. Ivankovskoe vodokhranilishche [Ivankovskoe reservoir]. *Izv. GosNIORH* [VNIRO News], 1975, vol. 102, pp. 5-25. (in Russian)

Edelshtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Russian reservoirs: ecological problems, ways of solutions]. Moscow, GEOS Publ., 1998, 277 p. (in Russian)

Deemer B.R., Holgerson M.A. Drivers of methane flux differ between lakes and reservoirs, complicating global upscaling efforts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, vol. 126 (e2019JG005600). <https://doi.org/10.1029/2019JG005600>

Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. *Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes*. Berlin, Springer, 2005, 732 p.

Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. Springer. *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, pp. 949-964.

Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol.18, 12 p.

Bastviken D.T. et al. Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling. *Environmental Science and Technology*, 2010, vol. 44, no. 14, pp. 5450-5455.

Lomov V.A., Stepanenko V.M., Grechushnikova M.G., Repina I.A. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611(012029).

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, 11 p.

Straskraba M., Tundisi J.G. Reservoir Water Quality Management. UNEP/ILEC Guidelines of lake management. Japan: *Int. Lake environment Committee (ILEC)*, 1999, vol. 9.

Сведения об авторах

Гречушникова Мария Георгиевна

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3
ведущий научный сотрудник
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, г. Москва, Воробьевы горы, 1
e-mail: allavis@mail.ru

Репина Ирина Анатольевна

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией
Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3
математик
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, г. Москва, Воробьевы горы, 1
119234, МГУ, ул. Колмогорова, 1с4
e-mail: repina@ifaran.ru

Ломова Диана Владиславовна

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Институт водных проблем РАН
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3
e-mail: florainter@mail.ru

Ломов Виктор Александрович

аспирант
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, г. Москва, Воробьевы горы, 1
e-mail: lomson06@mail.ru

Information about the authors

Grechushnikova Maria Georgievna

Candidate of Science (Geography)
Senior Research
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric
Physics RAS
3, Pyzhyovskiy pereulok, Moscow,
119234, Russian Federation
Senior Research
M. V. Lomonosov Moscow State University
1, Vorobiev Gory, Moscow, 119234,
Russian Federation
e-mail: allavis@mail.ru

Repina Irina Anatolievna

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics),
Head of the Laboratory
A. M. Obukhov Institute of Atmospheric
Physics RAS
3, Pyzhyovskiy pereulok, Moscow,
119234, Russian Federation
Mathematician
M. V. Lomonosov Moscow State University
1, Vorobiev Gory, Moscow, 119234,
Russian Federation
e-mail: repina@ifaran.ru

Lomova Diana Vladislavovna

Candidate of Science (Geography)
Senior Research
Institute of Water Problems RAS
3, Gubkin st., Moscow, 119333,
Russian Federation
e-mail: florainter@mail.ru

Lomov Viktor Alexandrovich

Postgraduate
M. V. Lomonosov Moscow State University
1, Vorobiev Gory, Moscow, 119234,
Russian Federation
e-mail: lomson06@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.16.

Статья поступила в редакцию 01.03.2022; одобрена после рецензирования 26.04.2022; принята к публикации 07.06.2022
The article was submitted **March, 1, 2022**; approved after reviewing **April, 26, 2022**; accepted for publication **June, 7, 2022**