

УДК 504.455+504.064.36:574
**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УДЕЛЬНОГО ПОТОКА
МЕТАНА С ВОДОХРАНИЛИЩ РАЗНОЙ ПРОТОЧНОСТИ**

М. Г. Гречушникова^{1,2)}, Д. В. Ломова²⁾, В.А. Ломов¹⁾

¹⁾*Московский государственный университет, Географический факультет,
Ленинские горы, 1, 119234, г. Москва, Россия, allavis@mail.ru;*

²⁾*Институт водных проблем РАН, ул. Губкина 3, 119333, г. Москва, Россия,
florinter@mail.ru*

По данным полевых измерений определены характерные масштабы изменений удельного потока метана с поверхности Можайского и Иваньковского водохранилищ в 2020-2021 гг. с различными погодными условиями. Показана роль факторов, определяющих удельный поток метана: проточность, стратификации водной толщи, кислородного режима, проточности водоема, характера донных отложений.

Ключевые слова: парниковые газы; водохранилище; метан; растворенный кислород.

**PECULIARITIES OF SPECIFIC METHANE FLUX FORMATION
FROM RESERVOIRS WITH DIFFERENT FLOW RATES**

M. G. Grechushnikova^{1,2)}, D. V. Lomova²⁾, V. A. Lomov¹⁾

¹⁾*Moscow State University, Geographical faculty, Leninskie Gory, 1, 119234, Moscow, Russia, allavis@mail.ru*

²⁾*Institute of water problems RAS, Gubkina st., 3 119333, Moscow, Russia, florinter@mail.ru*

Characteristic scales of changes in the specific methane flux from the surface of Mozhaiskoye and Ivankovskoye reservoirs in 2020-2021 with different weather conditions are determined based on field measurements. The role of various factors determining methane specific flux is shown: water flow, stratification of the water column, oxygen regime, water body flowability, nature of bottom sediments.

Keywords: greenhouse gases; reservoir; methane; dissolved oxygen.

Немногочисленность натурных измерений эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов ставит задачу параметризации этого процесса в глобальном масштабе. Полученные в работе [1] оценки потока метана для различных природных зон не всегда подтверждаются результатами измерений на водоемах [2]. Многолетние наблюдения на Можайском водохранилище показали, что УП метана изменяется не только по длине

водоема, но и значительно зависит от гидрологической структуры слабопроточного водоема в конкретном году, что определяется метеорологическими условиями года [3] (рис. 1). В работе приведено сравнение данных измерительных кампаний на Можайском и Иваньковском водохранилищах в 2020-2021 гг.

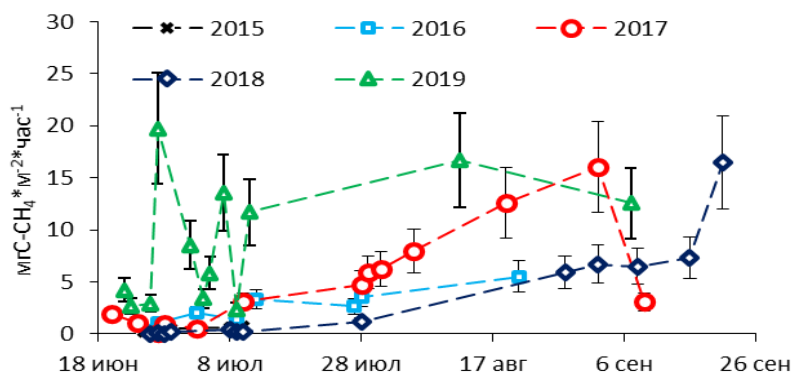


Рис. 1. Содержание метана в воде исследуемых водоемах

Выбранные водоемы различаются проточностью и режимом: Иваньковское водохранилище имеет среднегодовой коэффициент водообмена ($Kв$) $7,9 \text{ год}^{-1}$. Можайское водохранилище относительно глубоководно и слабопроточно ($Kв$ $1,78 \text{ год}^{-1}$). Большую часть периода открытой воды Можайское водохранилище стратифицировано, ниже слоя плотностного скачка ежегодно образуется бескислородная зона. В Иваньковском водохранилище стратификация выражена существенно меньше, а бескислородные условия устанавливаются только в периоды ослабления проточности при жаркой погоде [4]. В 2020-2021 гг. проведены гидрологические съемки на водоемах на станциях, отмеченных на рисунке 2. Состав работ: измерение вертикального распределения характеристик (температуры, растворенного кислорода), определение концентрации метана в водных пробах методом headspace, измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер, определение содержания органического вещества (ОВ) в грунте методом потерь при прокаливании. Комплекс измерений и используемое оборудование описаны в [5].



Рис. 2. Схема размещения станций на исследуемых водоемах

Съемки были проведены в следующие сроки: на Иваньковском водохранилище 5-6.08.2020 г. и 4-5.08.2021 г., на Можайском водохранилище 12-13.08.2020 г. и 30.06.2021 г. Погодные условия, предшествовавшие съемкам, определили особенности вертикального распределения характеристик в водоемах. В 2020 г. наблюдалась частая смена погоды: относительно жаркая погода в июне с температурой воздуха до 29-31°C перемежалась похолоданиями до 10 °C с усилением скорости ветра до 8-10 м/с. Во второй половине июля преобладала циклоническая погода с обильными осадками, усилением ветра до 10-12 м/с и ночными похолоданиями до 8-10 °C, которая сменилось потеплением в 1 декаде августа до 26-28 °C. В 2021 г. в июне наблюдалось повышение температуры воздуха до 25-35 °C, а в первые две декады июля преобладала маловетренная жаркая погода с дневными значениями температуры воды более 25 °C, и ночными более 15 °C, с небольшим похолоданием в третьей декаде (днем до 21°C, ночью до 13 °C) с дальнейшим потеплением. В 2021 г. проточность водохранилищ была существенно меньше, чем в 2020 г. за счет малого притока воды (табл. 1).

Таблица 1

Уровень воды и суммарный приток в водохранилища

Вдхр	Можайское		Иваньковское	
Год	2020			
Приток, млн м³	Июнь 61,5	Июль 103,7	Июнь 1074	Июль 1295
Год	2021			
Приток, млн м³	Май 30,9	Июнь 12,4	Июнь 294,9	Июль 237,9

В данных условиях структура водной толщи водоемов была различна (табл. 2). В Иваньковском водохранилище отсутствовала бескислородная зона, только в 2021 г. у плотины в придонном слое содержание кислорода снизилось до 0,5 мг/л. В Можайском водохранилище в 2020 г. бескислородная зона присутствовала в метровом придонном слое в верхней и центральной части (I-III), а на глубоководных станциях поднималась до горизонтов 10-11 м. В 2021 г. из-за жаркой погоды в мае в придонных слоях у плотины к июню сохранилась холодная вода, где деструкция шла не активно и сохранилось содержание кислорода более 1 мг/л. На станции IV граница бескислородной зоны поднялась до горизонта 11 м, а на I-III до горизонта 3-4 м.

По данным измерений в верховьях обоих водохранилищ донные отложения представлены заиленным песком с содержанием ОВ менее 3 %. В центральном и приплотинном районах его содержание составляет 10-14 % на Можайском и 10-16 % в Иваньковском в пределах русловой ложбины, что, в сущности, весьма близко с учетом точности метода потерь при прокаливании. В августе 2021 г. в Иваньковском водохранилище накопилось в течение жаркого сезона больше ОВ: 12-17 %.

Таблица 2

Характеристики водной толщи водохранилищ, содержание и УП метана

Иваньковское водохранилище		съемка 4-5.08.2020					съемка 4-5.08.2021				
Станция	Гори-зонт	Глубина станции	T, °C	O ₂ , мг/л	CH ₄ , мкл/л	УП CH ₄ , мгC/м ² сут	Глубина станции	T, °C	O ₂ , мг/л	CH ₄ , мкл/л	УП CH ₄ , мгC/м ² сут
Городня	пов	12	20,8	8,3	16,6	62,3	12	22,6	9	4,7	10,5
	дно		20,1	7,6	16,8			21,6	3,9	4,6	
Дипкорпус	пов	10	21,4	9,2	8,7	30,2	10	23	10,5	10,8	296,2
	дно		19,9	5,3	12,6			21,5	3,5	17,2	
Конаково	пов	13	22	10,7	1,9	9,2	13	23	10,4	9,9	31,9
	дно		18,7	1,9	7,7			21,5	2,9	16	
Корчева	пов	14	23,9	10,1	3	9,7	14	24,6	10,7	7,8	223,8
	дно		18,9	1,1	13,3			21,9	2,5	68,5	
Плотина	пов	17	22,2	11,7	4,1	2,9	17	24,1	9,5	14,1	68,9
	дно		19,7	4,8	7,8			22	0,5	132,3	
Можайское водохранилище		съемка 12-13.08.2020					съемка 30.06.2021				
Станция	Гори-зонт	Глубина станции	T, °C	O ₂ , мг/л	CH ₄ , мкл/л	УП CH ₄ , мгC/м ² сут	Глубина станции	T, °C	O ₂ , мг/л	CH ₄ , мкл/л	УП CH ₄ , мгC/м ² сут
I Мышкино	пов	нд	нд	нд	нд	нд	5	22,2	9,4	17,9	43,6
	дно		нд	нд	нд			16,6	0	нд	
II Горки	пов	6	19,1	4,9	4,3	19,4	6,5	22	6,3	13,9	198,7
	дно		17,5	0,5	7,1			15,4	0	нд	
III Бесстужево	пов	8	20,2	7,3	15	244	9	21,9	8	15,4	9
	дно		17,8	0,5	3158			12,1	0	560	
IV Красновидово	пов	14,5	20,2	8,1	13,1	71,9	14	22,3	9,7	7,4	3,9
	дно		15,7	0,3	1808			10,5	0	110,5	
V Плотина	пов	19	22,3	13,4	7,2	18,2	18,5	23,3	10,9	5	16,7
	дно		19	0,3	1727			8,3	1,5	18,9	

Анализируя данные табл. 2 можно видеть, что по результатам 2020 г. в водохранилищах разной проточности, находящихся практически в одинаковых климатических условиях, содержание и удельный поток (УП) метана отличается на порядок. Основная причина этих различий состоит в особенностях кислородного режима, который определяется погодными условиями, стратификацией и проточностью каждого конкретного года. Из-за асимметричного продольного профиля имеет место большая пространственная неоднородность УП метана. В слабопроточном Можайском водохранилище наибольшие значения потока характерны для центрального района, который имеет относительно небольшую глубину (около 10 м), но при этом не перемешивается до дна при похолоданиях с сохранением бескислородной зоны. А в приплотинном глубоководном районе, где формируется донная водная масса с наиболее холодной водой, УП метана невелик. В водохранилище сезонного регулирования несмотря на проточный режим в определенных условиях (малый приток и жаркая погода) УП метана может достигать трехзначных величин при хорошем прогревании придонного слоя и накоплении свежего детрита при обильном цветении.

Наилучшим образом можно параметризовать УП либо при длительном ряде наблюдений, либо при наличии математической модели, которая воспроизведет УП при различных входящих условиях [6].

Анализ данных проведен при финансовой поддержке гранта РНФ 24-27-00034.

Библиографические ссылки

1. Johnson, M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JG006305>.
2. Репина И. А. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 6. С. 899-913.
3. Lomov V. et al. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, издательство IOP Publishing (Bristol, UK, England), 2020. V.611. P. 012029.
4. Гречушникова М. Г. и др. Результаты исследования внутриводоемных процессов Иваньковского водохранилища в различные годы и сезоны // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен», 2023. С. 102-107.
5. Гречушникова М. Г. и др. Пространственно-временные различия гидроэкологических характеристик и эмиссии метана Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы, издательство ФГБУ Издательство «Наука» (Москва), том 50, № 1. С. 81-89.
6. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic Modeling of the Variability of Methane Emissions from an Artificial Reservoir. Water 2024, 16, 76. <https://doi.org/10.3390/w16010076>.