

УДК 556.047

М.Г. ГРЕЧУШНИКОВА*^{}, И.А. РЕПИНА*^{***}, В.М. СТЕПАНЕНКО*, В.С. КАЗАНЦЕВ*^{***},
А.Ю. АРТАМОНОВ*^{***}, В.А. ЛОМОВ***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, allavis@mail.ru, repina@ifaran.ru, stepanen@srcc.msu.ru

**Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия, allavis@mail.ru

***Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Москва, пер. Пыжевский, 3,
Россия, repina@ifaran.ru, kazantsev@ifaran.ru, sailer@ifaran.ru

ЭМИССИЯ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ДОЛИННОГО МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Рассмотрены пространственно-временные изменения эмиссии метана с поверхности Можайского водохранилища. На основе данных полевых наблюдений 2015–2018 гг. выявлены сезонные изменения содержания и удельного потока метана для разных морфологических районов водохранилища. В слабопроточном Можайском водохранилище содержание метана в поверхностном и придонном слоях глубоководных районов в конце периода летней стратификации может различаться на три порядка. По результатам установки плавучих камер в центральном районе водохранилища с начала июня до конца периода прямой стратификации (август–сентябрь), общий поток метана увеличивался от менее 1 до 16 мг $\text{CH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Одновременная постановка двух типов плавучих камер позволила выявить характерные значения составляющих потока метана и проводить измерения в течение исследуемого периода. Выявлено, что в начале периода плотностного расслоения преобладает диффузионный поток, составляющий в среднем 0,2 мг $\text{CH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Дальнейший рост значений общего потока связан с увеличением его пузырьковой составляющей. По данным расчета, диффузный поток метана достигает наибольших значений в конце лета в менее глубоководных верховьях водохранилища. Установлено, что значительный рост значений общего потока метана наблюдается, когда верхняя граница бескислородной зоны доходит до нижней границы эпилимниона. Максимальных значений удельная плотность потока метана достигает перед разрушением прямой стратификации. Сравнение результатов полевых измерений с литературными данными показало, что масштаб эмиссии с водохранилищ замедленного водообмена умеренной зоны может быть занижен при оценках глобальной эмиссии метана.

Ключевые слова: гидрологический режим, водообмен, содержание метана, растворенный кислород, плавучие камеры, бескислородные условия.

M.G. GRECHUSHNIKOVA*^{}, I.A. REPINA*^{***}, V.M. STEPANENKO*, V.S. KAZANTSEV*^{***},
A.YU. ARTAMONOV*^{***}, V.A. LOMOV***

*M.V. Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, allavis@mail.ru, repina@ifaran.ru, stepanen@srcc.msu.ru

**Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences,
119333, Moscow, ul. Gubkina, 3, Russia, allavis@mail.ru

***A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
119017, Moscow, per. Pyzhevskii, 3, Russia, repina@ifaran.ru, kazantsev@ifaran.ru, sailer@ifaran.ru

METHANE EMISSION FROM THE SURFACE OF THE MOZHAISK VALLEY-TYPE RESERVOIR

This article deals with spatio-temporal changes in methane emission from the surface of the Mozhaisk reservoir. Seasonal changes in the content and specific flow of methane were revealed for different morphological areas of the reservoir, based on field observation data obtained in 2015–2018. In the low-flow Mozhaisk reservoir, the methane content in the surface and bottom layers of the deep-water areas at the end of the summer stratification period may differ by three orders of magnitude. According to results from measuring with floating chambers in the central area of the reservoir from early June to the end of the period of direct stratification (August–September) the total methane flow increased from less than 1 to 16 mg $\text{CH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\cdot\text{hour})$. Time-coincident measurements with floating chambers of two types revealed characteristic values of the methane flow components and their change during the sampling period. It was found that at the period of stratification the diffusive flux predominates with the mean

values 0,2 mg CH₄-C/(m²-hour). A further increase in the total methane flux is associated with an increase of its bubble component. According to calculations, the diffusive flux reaches its maximum values in late summer in the shallow zone of the reservoir. It is established that a significant increase of the values of the total methane flux is observed when the upper boundary of the oxygen-free zone reaches the lower boundary of the epilimnion. The specific methane flux density reaches its largest values prior to destruction of direct stratification. Comparison of field measurements with literature data showed that the magnitude of emission from reservoirs with a slow water exchange in the temperate zone can be underestimated in estimations of global methane emission.

Keywords: hydrological regime, water exchange, methane content, dissolved oxygen, floating chambers, oxygen-free conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка выбросов парниковых газов различными антропогенными источниками, к которым относятся и водохранилища, имеет актуальное значение. По различным оценкам, общая площадь искусственных резервуаров составляет 205–250 тыс. км² без учета зарегулированных озер (увеличением их площади при повышении уровня из-за строительства плотины на сбросной реке можно пренебречь). Интенсивность выбросов парниковых газов зависит от морфометрических параметров водохранилищ: метан в большем количестве попадает в атмосферу из мелководных частей акватории, чем с глубоководных, из-за меньшего окисления в менее мощной водной толще [1], а также геоэкологических условий их размещения (природной зоны, ландшафтных условий на водосборе, гидрологического режима, их возраста и др. [2]). В водохранилищах метан — это продукт анаэробного разложения органического вещества, поступающего с водосбора и продуцируемого в водоеме. Увеличение температуры воды интенсифицирует деятельность микроорганизмов, и эмиссия метана из водохранилищ зависит от этого показателя [3]. В умеренном поясе удельный поток метана с водохранилищ изменяется от 0,1 до 108,5 мг CH₄/(м²-сут), в субтропическом — от 9,9 до 75 мг CH₄/(м²-сут), в субэкваториальном — от 10 до 1140 мг CH₄/(м²-сут) [4]. Разброс значений указывает на то, что климат не является доминирующим фактором, определяющим удельный поток метана. Однако в низких широтах значения удельного потока метана существенно больше, чем в высоких. Методика оценки глобальной эмиссии метана с поверхности водохранилищ приведена в [4] с использованием в качестве основы базы данных Global Lakes and Wetlands Database (GLWD) [5]. Обращает на себя внимание большой разброс в значениях удельного потока метана с водохранилищ бореальной и тропической зоны, что может быть связано с недостаточностью натуральных экспедиционных данных [6]. В соответствии с рекомендациями по измерению удельного потока [1], для адекватной оценки эмиссии парниковых газов с поверхности водохранилищ рекомендованы ежемесячные измерения, но при этом некоторые оценки выполнены на основе эпизодических экспедиционных наблюдений. Следует отметить также и слабую изученность эмиссии парниковых газов для водохранилищ России [7], более 70 % которых морфологически относятся к долинному типу. Цель настоящей работы — оценка пространственно-временной изменчивости удельного потока метана с поверхности слабопроточного долинного водохранилища и среднегодового значения потока по данным измерений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — хорошо изученное в гидрологическом и гидрохимическом отношении Можайское водохранилище (рис. 1), расположенное в верховьях р. Москвы. Это небольшое морфометрически простое слабопроточное долинное водохранилище с отсутствием интенсивного динамического перемешивания и с коэффициентом водообмена 1,15 год⁻¹. Летом и зимой в нем наблюдается термическая стратификация [8]. Объем придонной водной массы с отсутствием кислорода и продолжительность ее существования связана с синоптическими условиями каждого года и с уровнем режимом водоема. Водоохранилище имеет асимметричный продольный профиль с увеличением максимальной глубины районов в затопленном русле р. Москвы от 5–7 м в верховьях до 20–23 м у плотины. Глубина затопленной поймы возрастает от 2–3 до 10–12 м соответственно.

Измерения значений удельного потока метана методом плавучих камер производились в 2015–2018 гг. в центральной части водоема в период открытой воды от 4 до 13 раз за сезон. Также осуществлялся регулярный отбор проб воды из поверхностного и придонного горизонтов на рейдовой вертикали IV (см. рис. 1) в Красновидовском плесе (10–20 раз за сезон) и периодические гидролого-гидрохимические съемки по продольной оси водохранилища (от 5 до 10 станций 3–5 раз в сезон) [9]. Отбор проб во время съемок производился на станциях, расположенных над затопленным руслом (см. рис. 1), которые отличаются характером грунта и скоростью потребления кислорода [10].



Рис. 1. Схема Можайского водохранилища и расположение станций гидрологической съемки над затопленным руслом р. Москвы.

I–V — станции. 1 — пункты отбора проб; 2 — пункт постановки плавучей камеры; 3 — населенные пункты; 4 — затопленная русловая сеть.

Для определения содержания метана в пробах воды и воздуха использовался метод фазово-равновесной дегазации [11]. Методом парофазной экстракции выделенная газовая фаза (объем пробы воды — 40 мл, воздуха — 20 мл, время встряхивания — 3 мин) переводилась для последующего анализа в стеклянные флаконы для лабораторных исследований [12, 13]. Концентрации метана определялись в двух-трехкратной повторности на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» (ЗАО «Хроматэк», г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором.

Удельный поток метана измерялся плавучими камерами по методологии, описанной в [13]. Время экспозиции составляло от 40 до 60 мин. Температура воды и растворенный в воде кислород определялись одновременно зондом YSI ProODO (Xylem Incorporated, США) с погрешностью измерений растворенного кислорода и температуры воды 0,1 мг/л и 0,2 °С соответственно. Для расчетов диффузионного удельного потока метана использованы данные о скорости ветра с автоматической метеостанции Davis Instruments (Davis Instruments Corporation, США), установленной на плавучей платформе на станции IV на высоте 2 м над поверхностью воды. При пропусках наблюдений были использованы данные метеостанции г. Можайска, расположенной в 5 км к юго-востоку от плотины. Расчет диффузионного удельного потока метана в атмосферу произведен методом тонкого поверхностного слоя TBL (Thin Boundary Layer, [1]) по разности концентрации метана между поверхностным и приводным слоями с использованием параметризации коэффициента обмена по [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего следует отметить различия в гидрологическом режиме водохранилища в исследуемые годы, который был обусловлен погодными особенностями (рис. 2). В 2015 и 2017 гг. начало периода формирования прямой стратификации было прохладным и ветреным — средние скорости ветра достигали 5–6 м/с, а в некоторые дни 7–8 м/с, также не наблюдалось резких переменов в изменении температуры воздуха в конце весны (см. рис. 2, а, б). Из-за сложившейся синоптической обстановки ветровое перемешивание продолжалось довольно долго, что привело к формированию менее устойчивой стратификации, чем в 2016 г. и особенно в 2018 г., когда разность температуры воды на горизонтах 0,5 и 10 м достигала существенно больших величин (см. рис. 2, в). Данные особенности термического режима определили плотное расслоение водоема и его кислородный режим в гипolimнионе, который в малопроточном водоеме зависит от условий перемешивания. В 2015 и 2017 гг. бескислородные условия в центральном районе водохранилища, по данным регулярных наблюдений на рейдовой вертикали IV, образовались во второй декаде июня и первой декаде июля соответственно, а азрация при разрушении стратификации отмечалась в третьей декаде августа и первой декаде сентября соответственно. В 2016 и 2018 гг. бескислородные условия наблюдались дольше: со второй декады июня по вторую декаду сентября и с первой декады июня по первую декаду октября. Но при этом верхняя граница бескислородной зоны достигала 7–8 м во все периоды, но в разное время в зависимости от интенсивности перемешивания. Данные особенности гидрологического режима отразились на режиме измерения содержания и эмиссии метана в годы, охваченные наблюдениями.

По результатам постановки плавучих камер в центральном районе водохранилища на станции IV в начале периода измерений (в июне) величина суммарного (диффузионного и пузырькового) удельного потока не превышает 3 мг C-CH₄/(м²·ч). К моменту окончания периода летней стратификации выявлено значительное увеличение значений удельного потока метана (до 16 мг C-CH₄/(м²·ч) в 2017

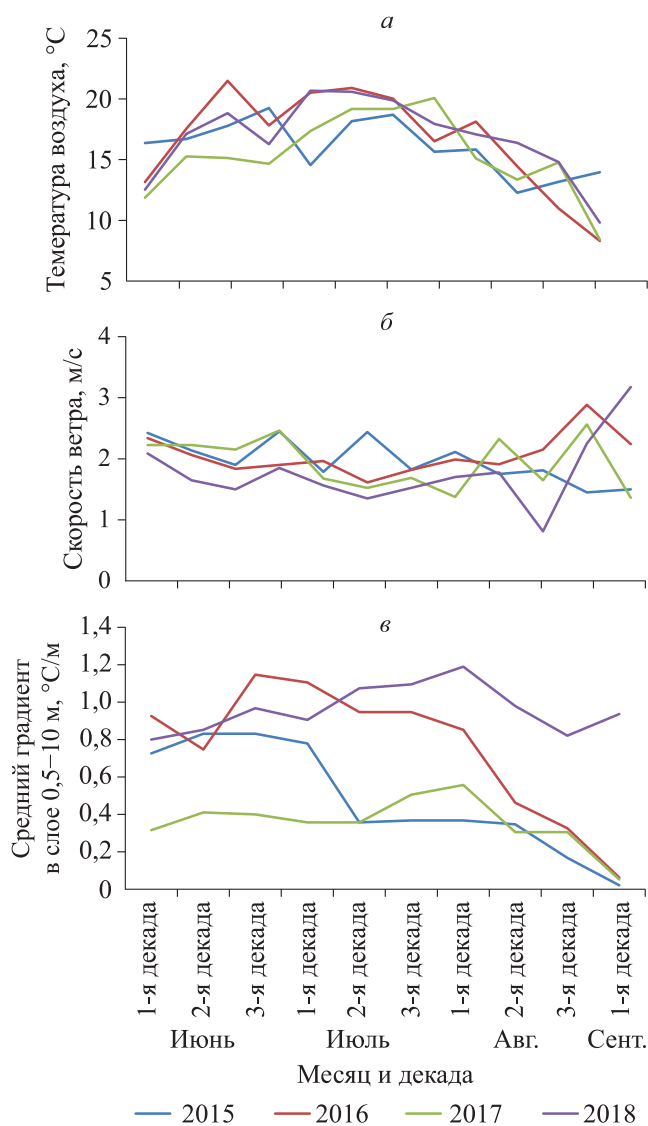


Рис. 2. Изменение среднедекадных значений температуры воздуха (°С) (а), скорости ветра (м/с) (б) и среднего градиента температуры воды в слое 0,5–10 м (°С/м) (в) в 2015–2018 гг.

Годы: 1 – 2015, 2 – 2016, 3 – 2017, 4 – 2018.

и 2018 гг. с наиболее продолжительными рядами наблюдений, когда бескислородная зона в придонных горизонтах достигла наибольшего объема, а также уменьшился градиент температуры воды в водной толще. Более 90 % общего удельного потока перед разрушением прямой стратификации составляет пузырьковый удельный поток, который определялся по разности общего и диффузионного удельного потока. В начале периода осеннего перемешивания значения удельного потока метана уменьшились на порядок (до 3 мг С-СН₄/(м²·ч) в первую декаду сентября 2017 г.). В 2018 г. отбор проб был прерван до разрушения прямой стратификации из-за аварии на судне.

В 2016 и 2018 гг. значения удельного потока метана за период после установления стратификации уменьшились по сравнению с аналогичными периодами 2017 г. (4–16 мг С-СН₄/(м²·ч): 3,5–5,5 мг С-СН₄/(м²·ч) в 2016 г. и 1,2–6,5 мг С-СН₄/(м²·ч) в 2018 г. Это связано с различием термического и кислородного режимов водоема в эти годы: в 2017 г. устойчивая стратификация из-за погодных условий образовалась поздно, и придонная температура воды в конце августа достигла 16,5 °С, вертикальное распределение температуры воды было однородным с максимальным градиентом не более 0,5 °С/м, поэтому охлаждение поверхностных

слоев воды в циклоническую погоду в конце августа привело к глубокому перемешиванию, увеличению содержания метана в поверхностном слое и его потока в атмосферу. В 2016 и в 2018 гг. придонный горизонт был изолирован плотностным расслоением, и к периоду осеннего охлаждения прогрелся всего до 14 и 12 °С соответственно, а максимальный градиент температуры воды достигал 2 и 4 °С соответственно.

Значительное увеличение значений удельного потока метана (до 16 мг С-СН₄/(м²·ч)) выявлено 02.09.2017 и 21.09.2018 в годы с наиболее продолжительными рядами наблюдений. В предшествующие периоды (17–23.08.2017 и 31.08–08.09.2018) наблюдалось «цветение» фитопланктона, связанное с поступлением автохтонного минерального фосфора, накопленного в придонных горизонтах за летний бескислородный период, после предшествующего глубокого перемешивания в циклоническую погоду. По-видимому, поступление порций свежего детрита на дно обусловило повышение его содержания в придонном слое до 3570 мкл/л 20.08.2017 и до 4960 мкл/л 9.09.2018 (см. рис. 2, з), что при последующем охлаждении и заглублении перемешивания увеличило удельный поток метана.

Значения диффузионного удельного потока метана, определенные расчетным методом ТВЛ над русловыми станциями по данным съемок в 2015–2018 гг., приведены на рис. 3. Пространственно-временная изменчивость диффузионного удельного потока метана имеет следующие закономерности. При образовании прямой температурной стратификации значения удельного потока метана составляют в верховьях водоема 0,03–0,07 мг С-СН₄/(м²·ч), у плотины — 0,02–0,04 мг С-СН₄/(м²·ч). В 2015 г.

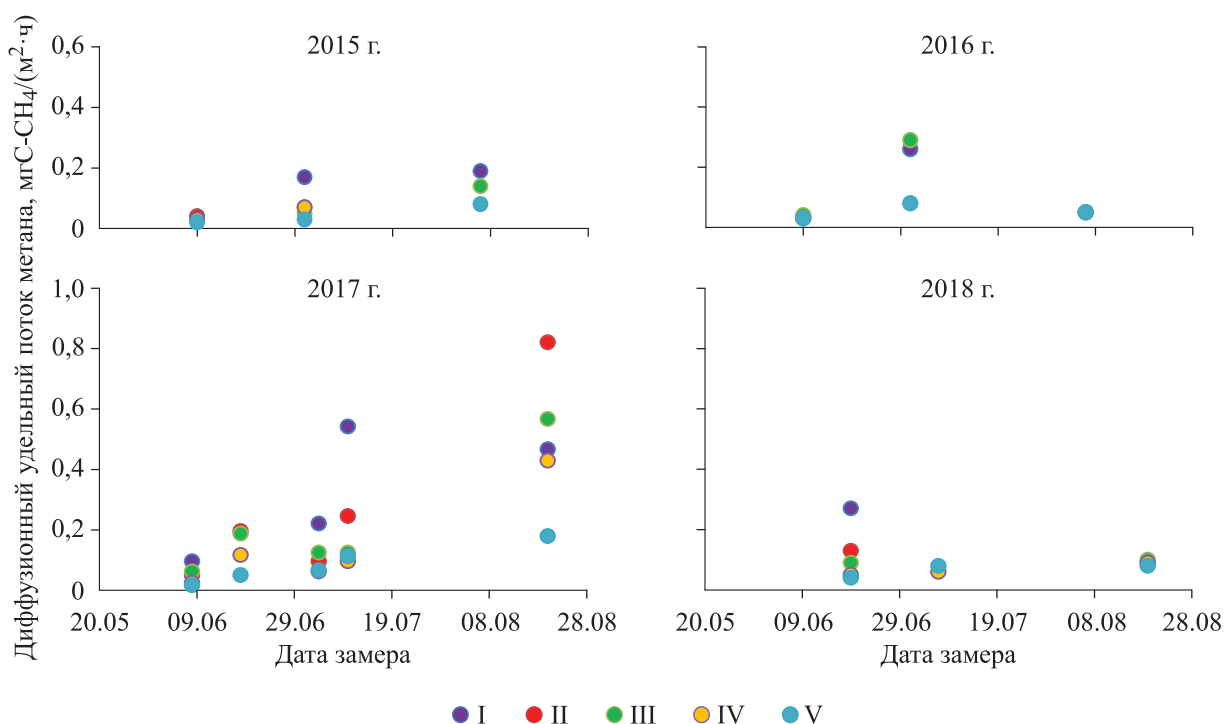


Рис. 3. Диффузионный удельный поток метана ($\text{мг С-СН}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$), рассчитанный методом ТВЛ по данным гидрологических съемок на опорных станциях.

I–V — опорные станции.

и особенно в 2017 г. выражено увеличение диффузионного потока в течение летнего периода при наибольшем содержании метана в поверхностном слое (табл. 1, 2) из-за регулярного ветрового перемешивания при слабой стратификации. В июле концентрация кислорода в верхней толще воды по данным съемок была наименьшей в 2017 г., в августе этого года наиболее высоко расположена верхняя граница бескислородной зоны (по сравнению с 2015 и 2016 гг. на 1–3 м). В 2016 и 2018 гг. наибольшие значения удельного потока (до $0,3 \text{ мг С-СН}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ в верховьях) были характерны, наоборот, в первую половину лета. В 2018 г. из-за наиболее устойчивой и продолжительной стратификации верхняя граница бескислородной зоны была также расположена на 7–8 м, как и в 2017 г., но низкая температура воды в приводном слое глубоководных отсеков обусловила меньшее содержание метана в придонном горизонте по сравнению с 2017 г. (в 1,5 и 2,5 раза на станциях IV и V), а соответственно, и у поверхности (в 1,8 и 1,4 раза).

Значения диффузионного удельного потока метана от верховьев к плотине уменьшаются из-за увеличения толщины аэрированного слоя воды и сокращения расстояния до источника метана — донных отложений. Эта закономерность наблюдается в 2015 и 2017 гг. с менее выраженной стратификацией. В 2016 и 2018 гг. значения диффузионного удельного потока в течение лета существенно не увеличивались, и пространственные изменения выражены только в начале лета. Таким образом, величина диффузионного удельного потока (которая определяется в большей степени содержанием метана в поверхностном слое) существенно зависит от глубины станции и перемешанного слоя, положения верхней границы бескислородной зоны и содержания метана в придонных горизонтах. Обобщенные закономерности изменения значений диффузионного удельного потока метана приведены в табл. 3. По данным исследования небольших бореальных озер Архангельской области [15], значительных пространственных изменений диффузионного удельного потока метана, в противоположность доливному водохранилищу, в них не обнаружено. Значения диффузионного удельного потока метана в озерах Темное и Светлое в весенний период оценены в пределах $0,05\text{--}0,1 \text{ мг С-СН}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$.

Полученные результаты согласуются с базой данных по разным составляющим интегрального потока метана с водохранилищ различных природных зон, представленной в [16].

Таблица 1

**Характерные значения параметров гидрологического режима водной толщи Можайского водохранилища
по данным съемок**

Дата	Станция	Температура воды, °С			Растворенный кислород, мг/л		
		поверхность	дно	макс. град.	поверхность	дно	верхняя граница бескислородной зоны, м
1	2	3	4	5	6	7	8
09.06.2015	I	18,8	14,5	2,4	8,9	2,7	Отсутствует » » » »
	II	18,6	14,6	3,5	8,9	2,3	
	III	18,8	11,7	2,4	10,6	1,3	
	IV	19	11,1	2,3	11,4	1,0	
	V	20,6	9,9	3,3	10,3	4,7	
01.07.2015	I	22,4	15,8	1,8	8,8	0	4
	II	22,6	16,2	1,1	8,8	0,3	4
	III	22,4	14,9	1,2	9,7	0,3	6
	IV	21,3	12,8	2	12,1	0,4	8
	V	23,1	9,9	1,9	12,2	0	10
06.08.2015	I	21,5	19	1,3	9,1	4	Отсутствует » 7 9 11
	II	21,7	19,4	0,7	12,9	1,2	
	III	23	18	2,2	19,1	0	
	IV	23	16,5	1,3	14,9	0,3	
	V	23,6	11,2	1,9	15,5	0,2	
09.06.2016	I	—	—	—	—	—	—
	III	14,7	10	3,1	8,9	3,6	Отсутствует —
	V	—	—	—	—	—	
04.07.2016	I	26,9	16,3	4,5	11,4	0,4	5
	III	26,1	13,5	2,7	11,2	0,3	5
	V	24,9	7,3	3,9	11,8	0,3	6
22.08.2016	I	19,8	16,3	1,2	9,7	5,7	Отсутствует 9 10
	III	20,5	18	0,3	9,3	0	
	V	21	8,8	1,7	9,8	0,3	
18.06.2017	I	19,6	13,2	4,6	9,6	4,6	Отсутствует » » » »
	II	17,9	13,5	1,4	9,1	4	
	III	18,5	11,7	3,3	11,4	1,4	
	IV	16,5	11,5	0,9	9,3	1,8	
	V	17,6	8	1,1	10,3	1	
10.07.2017	I	16,6	13,6	0,9	7,7	3,3	» » 9 12 15
	II	16,5	15,6	0,2	7	6	
	III	17,1	14,4	1	8,5	0	
	IV	17,3	13,8	0,9	9,3	0	
	V	18,6	9,1	3,3	10,7	0	
20.08.2017	I	24,6	19,3	1,6	16,3	2	Отсутствует 6 6 7 8
	II	24,3	19,5	1,4	14,8	0,3	
	III	24,3	19,1	1,8	13,4	0,2	
	IV	24,5	16,2	1,7	13,1	0,1	
	V	24,1	9,8	1,7	11,3	0	
19.06.2018	I	23,6	15,9	3,2	11,7	1,5	Отсутствует 6 8 10 —
	II	22,9	14,8	2,7	12,9	0,2	
	III	22,6	12,6	4,3	14,2	0,2	
	IV	22,6	9,2	2,5	14	0,1	
	V	22,7	6,2	3,2	12,2	2,8	
07.07.2018	I	21,1	17,7	1,3	10,5	1,5	Отсутствует 6 — 9 18
	II	20,8	18	0,8	10	0,2	
	III	—	—	—	—	—	
	IV	20,1	10,1	1,9	10,1	0,1	
	V	20,3	6,7	2,8	9,8	0,5	

ЭМИССИЯ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ДОЛИННОГО МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
19.08.2018	I	—	—	—	—	—	—
	II	21,3	19,6	0,9	11,3	2,8	—
	III	22,3	15,9	1,1	12,5	0,3	6
	IV	22,5	12	3	10,7	0,2	8
	V	22,6	7,8	1,9	8,4	0,1	7

Примечание. Здесь и в табл. 2: прочерк — нет данных.

Таблица 2

Содержание метана в воде Можайского водохранилища по данным гидрологических съемок в 2015–2018 гг.

Дата	Станция	Содержание метана, мкл/л		Дата	Станция	Содержание метана, мкл/л	
		поверхность	дно			поверхность	дно
09.06.2015	I	2,57	7,75	18.06.2017	IV	3,90	10,00
	II	2,27	5,13		V	2,27	8,88
	III	—	—	01.07.2017	I	22,61	14,14
	IV	1,48	6,41		II	11,06	284,94
	V	0,98	2,06		III	4,21	23,67
01.07.2015	I	10,91	505,03	IV	4,32	95,08	
	II	4,63	86,94	V	4,86	274	
	III	2,98	683,16	20.08.2017	I	24,24	14,40
	IV	3,47	948,26		II	23,03	11,86
	V	2,25	702,51		III	15,89	1752,71
06.08.2015	I	14,59	202,57		IV	11,98	3569,10
	II	—	—	V	9,44	2508,98	
	III	8,45	1452,55	19.06.2018	I	13,4	26,4
	IV	—	—		II	6,5	141,1
	V	4,59	2329,98		III	5,7	106,6
09.06.2016	I	—	—		IV	3,7	3,4
	III	2,8	49	V	2,6	6,7	
	V	—	—	07.07.2018	I	—	—
04.07.2016	I	12,36	453,05		II	—	—
	III	8,89	948,43		III	—	—
	V	3,8	63,32		IV	4,8	215,9
22.08.2016	I	4,79	7,03		V	4,2	5,8
	III	5,41	2475	19.08.2018	I	—	—
	V	4,42	—		II	—	—
18.06.2017	I	9,30	10,30		III	9,0	—
	II	6,35	18,56		IV	6,8	2384,8
	III	4,61	9,08		V	—	1016,4

Таблица 3

Характерные расчетные значения диффузионного удельного потока метана в Можайском водохранилище (мг C-CH₄/(м²·ч) по данным за 2015–2018 гг.

Район	Месяц								
	июнь			июль			август		
	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.
Верховья	0,1	0,03	0,27	0,16	0,07	0,26	0,3	0,05	0,82
Центральный	0,1	0,04	0,19	0,16	0,05	0,29	0,21	0,05	0,57
Приплотинный	0,04	0,02	0,11	0,06	0,03	0,08	0,13	0,03	0,43

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведенный комплекс исследований масштабов эмиссии метана с поверхности слабопроточного долинного искусственного водоема на примере Можайского водохранилища позволил получить характерные значения содержания данного газа в толще воды и его потока в атмосферу. Исследования выполнены в соответствии с принятыми в мировой практике методами, что обеспечивает достоверность полученных результатов. Различия погодных условий в годы исследований, повлиявшие на особенности формирования гидрологической структуры водохранилища, позволили выявить влияние внутриводоемных процессов на результирующий поток метана с поверхности водоема.

Установлена существенная пространственно-временная неоднородность значений удельного потока метана, обусловленная различием гидрологического режима его районов, отличающихся средней глубиной. Содержание метана в водохранилище определяется синоптической ситуацией, особенностями плотностного расслоения, термического и кислородного режимов водоема в тот или иной год. По данным наблюдений, наибольших значений удельный поток метана достигает перед разрушением прямой стратификации — 16 мг C-CH₄/(м²·ч). При расчете годовой эмиссии с поверхности водохранилищ необходимо непременно учитывать пространственно-временную неоднородность распределения значений удельного потока метана, которой отличаются водохранилища долинного типа (к нему относится большинство искусственных водоемов мира). Для более детальной оценки эмиссии метана с поверхности водохранилищ, особенно в случае неисследованных водоемов или при наличии нерегулярных экспедиционных данных, возможно использовать математические модели, например [17].

В качестве перспектив развития исследования можно отметить такие направления, как изучение потоков метана на границе «вода — донные отложения», оценку выброса газа за периоды весеннего и осеннего перемешивания, а также поступление с притоком и дегазацию при сбросах воды через плотину. Для продолжения изучения пространственно-временной изменчивости потока метана эффективно проведение одновременного мониторинга интенсивности продукционных процессов, которые приводят к пересыщению поверхностных слоев кислородом и усилению седиментации органического вещества. При наличии выраженной стратификации и отсутствии кислорода у дна фактором поперечных изменений величины потока метана могут быть сгонно-нагонные явления, вызывающие апвеллинг холодных, богатых метаном вод гипоплимниона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (17–05–41095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldenfun J.A. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. — London: International Hydropower Association, 2010. — 154 p.
2. Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Ломова Д.В., Мольков А.А., Капустин И.А. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Изв. РГО. — 2018. — Т. 150, вып. 5. — С. 14–33.
3. Rosa L.P., Dos Santos M.A., Matvienko B., Dos Santos E.O., Sikar E. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions // Climatic Change. — 2004. — Vol. 66, N 1–2. — P. 9–21.
4. Varis O., Kumm M., Harkunen S., Huttunen J.T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs: Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. — Berlin: Springer, 2012. — 154 p.
5. Lehner B., Dull P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // Journ. Hydrol. — 2004. — Vol. 296, N 1–4. — P. 1–22.
6. Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes. Environmental Science / Eds. A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau. — Berlin: Springer, 2005. — 743 p.
7. Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Chusov A.N., Atrashenok V.P., Molodtsov D.V., Savvichev A.S., Zinchenko A.V. Reservoir greenhouse gas emissions at Russian HPP // Power Technology and Engineering. — 2015. — Vol. 49, N 1. — P. 33–39.
8. Пуклаков В.В., Даченко Ю.С., Гончаров А.В., Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Ершова М.Г., Белова С.Л., Соколов Д.И., Пуклакова Н.Г., Ерина О.Н., Аракелянц А.Д. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). — М.: Перо, 2015. — 284 с.
9. Гречушникова М.Г., Бадюков Д.Д., Саввичев А.С., Казанцев В.С. Сезонные и пространственные изменения содержания метана в Можайском водохранилище в летний период // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 11. — С. 67–78.

10. **Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В.** Об оценке потребления кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период // Метеорология и гидрология. — 2006. — № 10. — С. 82–91.
11. **Большаков А.М., Егоров А.В.** Результаты газометрических исследований в Карском море // Океанология. — 1995. — Т. 35, № 3. — С. 399–404.
12. **Методические указания.** Методика выполнения измерений концентрации метана в водах парофазным газохроматографическим методом. РД 52.24.512-2002 [Электронный ресурс]. — <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/58/58398/index.htm> (дата обращения 13.12.2018).
13. **Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.** Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. — 2004. — Vol. 18. — GB4009.
14. **Cole J.J., Saraco N.F.** Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ // Limnol. Oceanogr. — 1998. — Vol. 43, Issue 4. — P. 647–656.
15. **Забелина С.А., Климов С.И., Чупаков А.В., Покровский О.С., Егоров А.В., Гуерин Ф., Широкова Л.С.** Эмиссия метана с поверхности контрастных бореальных озер // Тез. докл. и станд. сообщ. междунар. конф. «Пресноводные экосистемы — современные вызовы». — Иркутск: Мегапринт, 2018. — С. 374–375.
16. **Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Delsontro T., Barros N., Bezerra-Neto J., Powers S.M., Dos Santos M.A., Vonk J.A.** Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis // BioScience. — 2016. — Vol. 66, Issue 11, N 1. — P. 949–964.
17. **Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T.** LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // Geosci. Model Dev. — 2016. — Vol. 9, Issue 5. — P. 1977–2006.

Поступила в редакцию 15.10.2018

После доработки 20.12.2018

Принята к публикации 02.04.2019