

water is analyzed. The temporal dynamics and the response of the chemical composition of the lake water to the impact of acid-forming substances depending on the load level (the distance of combines), geologically controlled sensitivity of catchment areas of the lakes studied to acid deposition, and the lake areas is discussed.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА НА ГРАНИЦАХ «ВОДА-ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ» И «ВОДА-АТМОСФЕРА»

^{1,2}М.Г. Гречушникова, ^{1,3}И.А. Репина, ³В.С. Казанцев, ³А.Ю. Артамонов,
²Д.В. Ломова, ²Е. Р. Кременецкая, ¹В.А. Ломов

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

² *Институт водных проблем РАН*

³ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

В работе приведены результаты полевых наблюдений 2015-2018 гг. и экспериментов по изучению потоков метана на границах «вода-донные отложения» и «вода-атмосфера» на Можайском водохранилище. Содержание метана в водохранилище определяется синоптической ситуацией, особенностями плотностного расслоения, термического и кислородного режима водоема в тот или иной год. По результатам постановки плавучих камер в центральном районе водохранилища в начале периода летней стратификации величина суммарного потока не превышает $3 \text{ мгС-СН}_4/(\text{м}^2 \text{ час})$, причем пузырьковая составляющая практически отсутствует. К концу периода прямой стратификации выявлено увеличение общего потока метана до $16 \text{ мгСН}_4\text{-С}/(\text{м}^2 \text{ час})$ за счет роста пузырькового потока. Поток метана из донных отложений также характеризуется большой пространственно-временной изменчивостью.

Актуальность исследования выделения метана в атмосферу обусловлена как общей задачей оценки выбросов парниковых газов различными антропогенными источниками, к которым относятся искусственные водоемы, так и недостаточным изучением сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости потока метана с поверхности водоемов.

Объект исследования – слабопроточное морфометрически простое долинное Можайское водохранилище с коэффициентом водообмена $1,15 \text{ год}^{-1}$ (рис. 1), расположенное в верховьях р. Москвы. Летом и зимой в нем наблюдается термическая стратификация, объем придонной водной массы с отсутствием кислорода и продолжительность ее существования связана с синоптическими условиями каждого года и с уровнем режимом водоема [Пуклаков и др. 2015]. Можайское водохранилище по величине биомассы относится к мезотрофно-евтрофным водоемам, наибольшая активность продукционно-деструкционных процессов приходится на май (развитие диатомовых и зеленых водорослей) и август-сентябрь (динофитовые и синезеленые водоросли) [Гречушникова и др., 2002]. Донные отложения Можайского водохранилища по классификации В.П. Курдина [Курдин В.П., 1960] представляют собой вторичные неорганические грунты со сравнительно небольшим содержанием органических веществ: 6-16% для илов; 4-8% для илистых песков и менее 4% для песков [Бреховских и др., 2006]. Однако, последние два типа грунта занимают не более 20% площади дна водоема: преимущественно в верховьях и на мелководьях.

Измерения потока метана методом «плавающих камер» производились в 2015-2018 гг. в центральной части водоема в период открытой воды. В ходе исследований использовались две разные камеры: камера общего потока и диффузионная камера, которая отличалась от общей наличием подводного щита в 70 см от нижней границы камеры для отклонения всплывающих пузырьков [Bastviken et. al., 2010]. Также производился регулярный отбор проб воды из поверхностного и придонного горизонтов на рейдовой вертикали IV (рис. 1) и периодические гидролого-гидрохимические съемки с отбором проб грунта для экспериментов по продольной оси водохранилища. Для определения содержания метана в пробах воды и воздуха использовался метод фазово-равновесной дегазации [Большаков и др., 1995]. Выделенная газовая фаза переводилась для последующего анализа на газовом хроматографе "Кристалл 5000.2" в стеклянные флаконы для лабораторных исследований [Bastviken et. al., 2004]. Плотность потока метана измерялась плавучими камерами по методологии, описанной в [Bastviken et. al., 2004]. Температура воды и растворенный в воде кислород определялись зондом YSI ProODO с погрешностью измерений растворенного кислорода и температуры воды 0,2 °C и 0,1 мг/л соответственно. Для расчетов диффузионного потока метана использованы данные о скорости ветра и давлении с автоматической метеостанции Davis Instruments, установленной на плавучей платформе на станции IV на высоте 2 м над поверхностью воды, а при пропусках наблюдений были использованы данные метеостанции г. Можайска (рис. 1) в 5 км к юго-востоку от плотины. Расчет диффузионного удельного потока метана в атмосферу произведен методом тонкого поверхностного слоя TBL (Thin Boundary Layer, [UNESCO..., 2010]) по разнице концентрации метана между поверхностным и придонным слоями использованием параметризации коэффициента обмена по [Cole et. al. 1998]. Определение потоков газо- и массообмена на границе «вода-донные отложения» проводилось методом трубок Кузнецова-Романенко [Романенко, 1985]. Образцы грунтов отбирались дночерпателем Экмана-Берджа, образцы грунта со слоем придонной воды над ним отбирались в стеклянные трубки с притертыми крышками. В лаборатории трубка под крышку заливалась отобранной на станции одновременно с пробой грунта водой придонного горизонта. Этой же водой заливалась и «холостая» трубка без грунта.

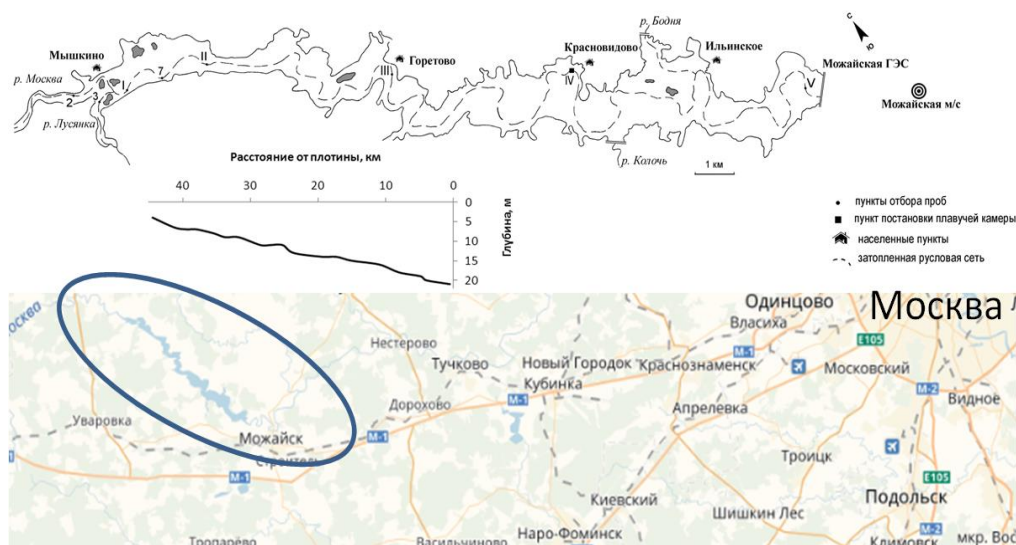


Рис. 1. Схема Можайского водохранилища

Трубки ставились на экспозицию при температуре близкой к температуре придонной воды в момент отбора пробы на сутки. В конце опыта вода из трубок сливалась сифоном, и в ней определялось содержание исследуемых показателей. Поток вещества с 1 м^2 площади дна за время экспозиции F определялся по формуле:

$$F (\text{мг/м}^2\text{сут}) = 240 * (C_{\text{тр}} - C_{\text{хол}}) * L/t,$$

где $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{хол}}$ – концентрация вещества в трубке с грунтом и холостой (контрольной) трубке, мг/л; L - высота столба воды над грунтом в трубке, см; t - время экспозиции, час.

Многочисленные постановки плавучих камер в центральном районе водохранилища на станции IV позволили выявить следующие закономерности. В начале периода прямой стратификации, когда в придонных слоях воды отсутствует дефицит кислорода (обычно в июне), величина суммарного (диффузионного и пузырькового) потока не превышает $3 \text{ мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ час})$. К моменту окончания периода летней стратификации, когда в придонных горизонтах формируются бескислородные условия, выявлено увеличение значений удельного потока метана. В 2017 и 2018 гг. с наиболее продолжительными рядами наблюдений (рис. 2) плотность потока метана в атмосферу достигла $16 \text{ мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ час})$, когда бескислородная зона в придонных горизонтах достигла наибольшего объема, а также уменьшился градиент температуры воды в водной толще перед периодом осенней конвекции. Более 90% общего удельного потока перед разрушением прямой стратификации составляет пузырьковый поток, который определялся по разности общего и диффузионного потока. В начале периода осеннего перемешивания значения удельной плотности потока метана уменьшились на порядок (до $3 \text{ мг С-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ час})$). Значительные различия значений плотности потока метана, которые особенно ярко проявились в 2017 и 2018 гг., связаны с особенностями гидрологической структуры водоема, обусловленной особенностями синоптических условий. В 2015 и 2017 гг. в начале периода формирования прямой стратификации наблюдалась прохладная и ветренная погода (до $5-6 \text{ м/с}$, а в некоторые дни $7-8 \text{ м/с}$). Ветровое перемешивание привело к формированию менее устойчивой стратификации, чем в 2016 и особенно в 2018 гг, когда градиент температуры воды на горизонтах $0,5$ и 10 м , где были установлены самописцы, достигал существенно больших величин: $0,8-1 \text{ }^\circ\text{C/м}$ в 2016 и 2018 гг, и $0,3-0,4 \text{ }^\circ\text{C/м}$ в 2017 г. В 2018 г. низкие значения температуры придонной воды сохранялись (градиент температуры воды составлял в среднем $1-1,2 \text{ }^\circ\text{C/м}$ и уменьшился только к концу августа до $0,8 \text{ }^\circ\text{C/м}$). В 2017 г. максимальное значение среднего градиента температуры толщи воды между горизонтами $0,5$ и 10 м не превышало $0,6 \text{ }^\circ\text{C/м}$ и к концу лета снизилось до $0, \text{ }^\circ\text{C/м}$. Данные особенности термического режима определили плотностное расслоение водоема и его кислородный режим в гипolimнионе, который в малопроточном водоеме зависит от условий перемешивания. В 2017 гг. бескислородные условия в центральном районе водохранилища по данным регулярных наблюдений на рейдовой вертикали IV образовались в 1 декаде июля, а аэрация при разрушении стратификации отмечалась в 1 декаде сентября. В 2016 и 2018 гг. бескислородные условия наблюдались дольше: со 2 декады июня по 2 декаду сентября и с первой декады июня по 1 декаду октября. Но при этом верхняя граница бескислородной зоны достигала $7-8 \text{ м}$ 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.

Выделение метана грунтами дна также характеризуется большой пространственно-временной изменчивостью (табл. 1).

Таблица 1. Выход метана из грунта, содержание ОВ в грунте, температура и содержание кислорода в придонной воде по данным съемок 2017-2018 гг.

Станции	Год	Выход CH ₄ , мг/м ² сут	ОВ, %	T, °C	O ₂ , мг/л
июнь					
I	2017	0,1	10,9	13,2	4,6
	2018	47	4,5	15,9	1,5
II	2017	1,5	13,4	13,5	4
	2018	84	11,4	14,8	0,2
III	2017	0,02	13,5	11,7	1,4
	2018	16	12,3	12,6	0,2
IV	2017	0,2	12	11,5	1,8
	2018	1	10,4	9,2	0,1
V	2017	5	12,7	8	1,2
	2018	23	14	6,2	2,8
июль					
I	2017	0,5	6,8	13,6	3,3
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
II	2017	16	13,4	15,6	6
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
III	2017	14	12,8	14,4	0,2
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
IV	2017	18	12,9	13,5	0
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
V	2017	41	15,5	9,1	0
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
август					
I	2017	53	10,1	19,3	2
	2018	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
II	2017	51	12	19,5	1
	2018	139	8,4	19,6	2,8
III	2017	64	12,6	19,1	0
	2018	247	13,9	15,9	0
IV	2017	54	12,6	16,2	0
	2018	192	11,4	12	0
V	2017	89	13,9	9,8	0
	2018	33	14	7,8	0

Наименьшие значения потока метана в 2017 г. наблюдались в начале лета и увеличивались к августу по мере формирования бескислородной зоны в водоеме и увеличения температуры придонной воды, которая определяет интенсивность процессов метаногенеза. В 2018 г. значения потока метана из донных отложений было выше из-за

более раннего наступления дефицита кислорода у дна. Из-за небольшой изменчивости содержания органического вещества в грунтах зависимость потока метана от этого фактора не выявлена.

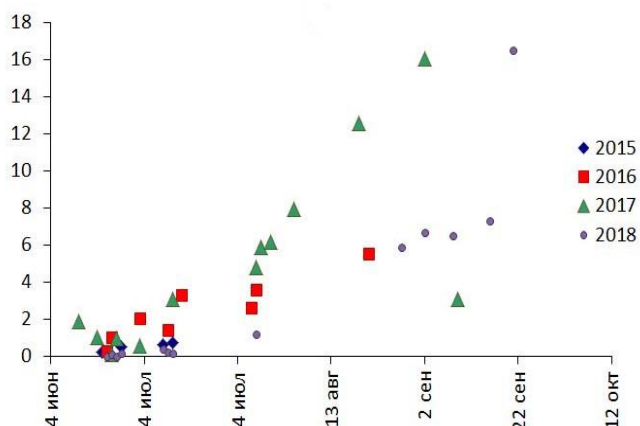


Рис. 2. Значения удельного потока метана $\text{mgC-CH}_4/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$, полученные методом плавучих камер на станции IV в 2015-2018 гг.

Поток метана из донных отложений в 2017 г. был меньше по сравнению с 2018 г., но при этом для потока с поверхности водоема по данным измерений на рейдовой вертикали наблюдалась обратная закономерность, что связано с особенностями стратификации водной толщи, рассмотренными выше, и указывает на важность учета гидрологического режима водоема при изучении вопросов, связанных с оценками глобальной эмиссии такого парникового газа, как метан.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РГО_a 17-05-41095.

Литература

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.

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

Гречушников М.Г., Гончаров А.В., Белов А.Ю., Калашникова Е.Г. Изменение гидротермического режима и интенсивность развития весеннего фитопланктона Можайского водохранилища // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2002. № 3. С. 22-25.

Курдин В.П. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ // Бюллет. Ин-та биологии внутр. вод. 1960. №8. С 9-11.

Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Гончаров А.В., Эдельштейн К.К., Гречушников М.Г., Ершова М.Г., Белова С.Л., Соколов Д.И., Пуклакова Н.Г., Ерина О.Н., Аракельянц А.Д. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). М.: Перо, 2015. 284 с.

Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 294 с.

Bastviken D., Santoro A.L., Marotta H., Pinho L.Q., Calheiros D.F., Crill P., Enrich-Prast A. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science & Technology. 2010. 44. P. 5450–5455.

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. V. 18. GB4009.

Cole J.J., Caraco N.F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ // *Limnol. Oceanogr.* 1998. V. 43. P. 647–656.

UNESCO/The International Hydropower Association. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs; Goldenfum, J.A., Ed.; London, UK, 2010.

EXPERIMENTAL STUDY OF METHANE EMISSION ON THE BORDERLINES «WATER-SEDIMENTS» AND «WATER-ATMOSPHERE»

**M.G. Grechushnikova, I.A. Repina, V.S. Kazancev, A.Yu. Artamonov, D.V. Lomova,
E.R. Kremeneckaya, V.A. Lomov**

The paper presents the results of field observations in 2015-2018 гг. and experimental study of methane fluxes on the borderlines “water-sediments” and “water-atmosphere” at the Mozaisk reservoir. It is detected that methane content depends on synoptic situation, density stratification, thermal and oxygen regime in certain year. According to results of “floating chambers” in the central part of the reservoir in the beginning of stratification period total methane flux does not exceed 3 mgC-CH₄/(m² hour), with absence of bubble flux. In the end of stratification period total flux grows up to 16 mgCH₄-C/(m² hour) due to bubble flux. The flux from sediments also has significant spatio-time variability.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОЗЕР ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

¹И.Л. Григорьева, ¹А.Б. Комиссаров, ²В.В. Кузовлев, ¹Е.А. Чекмарева

*¹Иваньковская научно-исследовательская станция –
филиал Института водных проблем РАН*

²Тверской государственный технический университет

Проведен сравнительный анализ современного качества воды ряда озер Тверской области различного типа: Бологое, Великое, Волго, Селигер, Серемо, Сиг, Стерж, Удомля, Шлино. Установлено, что качество воды в озерах зависит от преимущественного типа питания и величины антропогенной нагрузки. В озере Бологое, испытывающего значительную антропогенную нагрузку, отмечены более высокие, чем в воде других озер, концентрации сульфатов, хлоридов и нитритов. Воды озера Великое наиболее цветные и отличаются более высокими концентрациями железа общего и аммонийного иона из-за высокой доли болотных вод в питании озера. Воды большинства исследованных озер маломинерализованные, нейтрально–щелочные, относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе.

На территории Тверской области расположено более 3500 озер и искусственных водоемов общей площадью около 1850 км², в том числе около 1750 озёр площадью более 0.01 км² и ряд озёр меньшего размера.