

- [15] Porosenkov Yu. V., Didenko O. V. Osnovy teorii kompleksnogo geograficheskogo issledovaniya sel'skoj mestnosti oblastnogo regiona // Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta. Ser. Geografiya. Geoe'kologiya. 2007. N 2. S. 54—58.
- [16] Rejting social'no-e'konomicheskogo razvitiya regionov. [E'lektronnyj resurs]. URL: <http://www.credinform.ru/ru-RU/herald/details/19c92def28d9> (data obrashheniya: 5.10.2016)
- [17] Rodoman B. B. Territorial'nye arealy i seti. Ocherki teoreticheskoy geografii. Smolensk: Ojkumena, 1999. 256 s.
- [18] Fetisov Yu. M., Krupko A. E'. Mnogomernyj korrelyacionno-regressionnyj analiz. Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2015. 88 s.
- [19] Cherkashin A. K. Polisistemnoe modelirovanie. Novosibirsk, 2005. 279 c.
- [20] Chibilyov A. A. E'kologicheskaya optimizaciya stepnyh landshaftov. Sverdlovsk: UrO RAN, 1992. 172 s.
- [21] Chibilyov A. A. Osnovy stepevedeniya. Orenburg: Dimur, 1998. 120 s.
- [22] Chibilev A. A., Petrishchev V. P., Cherkasova Y. V., Akhmetov R. S. Cluster differentiation of municipal districts of Orenburg oblast by features of rural settlement pattern // Regional Research of Russia. 2015. T. 5, N 3. P. 263—269.
- [23] Giannakas K., Fulton M. The economics of coupled farm subsidies under costly and imperfect enforcement // Agricultural Economics. 2000. T. 22, N 1. P. 75—90.
- [24] Heady E. O. Models for agricultural policy: the card example // European Review of Agricultural Economics. 1983. T. 10, N 1. P. 1.

DOI: 10.7868/S086960711805002X

Изв. РГО. 2018. Т. 150, вып. 5

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ И ЭМИССИИ МЕТАНА В ВОДОХРАНИЛИЩАХ С РАЗЛИЧНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ВОДООБМЕНА

© **М. Г. ГРЕЧУШНИКОВА**,^{*,**1} **И. А. РЕПИНА**,^{***,*2} **В. М. СТЕПАНЕНКО**,^{*3}
В. С. КАЗАНЦЕВ,^{****4} **А. Ю. АРТАМОНОВ**,^{*****5} **М. И. ВАРЕНЦОВ**,^{*****6}
Д. В. ЛОМОВА,^{**7} **А. А. МОЛЬКОВ**,^{*****8} **И. А. КАПУСТИН**^{*****9}

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

** Институт водных проблем РАН, Москва

*** Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

**** Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

E-mail: ¹ allavis@mail.ru

² repina@ifaran.ru

³ stepanen@srcc.msu.ru

⁴ stepanen@srcc.msu.ru

⁵ sailer@ifaran.ru

⁶ mvar91@gmail.com

⁷ florainter@mail.ru

⁸ wave3d@mail.ru

⁹ kapustin-i@yandex.ru

В статье рассматриваются пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана с поверхности разнотипных водохранилищ. На основе сравнения данных полевых наблюдений на Можайском и Горьковском водохранилищах показаны различия содержания и удельных потоков

метана для водоемов с различной проточностью и гидрологическим режимом. Для Горьковского водохранилища характерны существенно меньшая пространственная изменчивость содержания метана, чем в слабопроточном Можайском водохранилище, и относительно небольшие его концентрации из-за меньшего времени водообмена, которое оказывает влияние на гидрологический режим. Содержание метана в озерной части Горьковского водохранилища в августе 2017 г. в поверхностном слое составляло 3.5—7 мкл/л, в придонном слое — 3.6—12.6 мкл/л, в то время как в Можайском — 12—24 и более 1500 мкл/л соответственно. По результатам установки плавучих камер в середине августа 2017 г. поток метана в озерной части Горьковского водохранилища не превышал 1.6 мг $C-CH_4/(m^2 \cdot ч)$, в то время как на Можайском водохранилище составлял более 10 мг $C-CH_4/(m^2 \cdot ч)$. 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: водохранилища, гидрологический режим, проточность, водообмен, содержание метана, эмиссия метана в атмосферу.

Введение. Водохранилища стали неотъемлемой составляющей различных регионов России. Берега этих рукотворных «морей» интенсивно заселены и являются регионами активной экономической деятельности. Характеристики водной поверхности существенно отличаются от характеристик суши, что вносит значительные изменения в режим взаимодействия атмосферы и поверхности [48]. Поэтому кроме очевидного хозяйственного значения водохранилища стали и источником проблем, с которыми раньше жители удаленных от морей территорий не сталкивались, — это и изменение ветрового режима, и повышенное влагосодержание атмосферы, которое приводит к туману, гололедам и изморози. Большие резервуары воды изменили климат прилегающих территорий, и эти изменения часто служат причиной экстремальных погодных явлений. Кроме того, водохранилища — источники эмиссии парниковых газов, в особенности метана и углекислого газа, что вносит вклад в глобальные климатические изменения [27, 45]. Но, несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с поверхности водохранилищ, данный вопрос остается открытым. При этом многочисленные исследования в различных странах мира (преимущественно в Канаде, США и Бразилии) показали, что интенсивность этой эмиссии может существенно различаться в зависимости от возраста водохранилища, проточности, сезона наблюдений и многих других факторов. В настоящее время планируется внесение изменений в действующее законодательство Российской Федерации, регулирующие выбросы парниковых газов и компенсацию углеродного следа хозяйствующих субъектов. И здесь роли водохранилищ будет уделено особое внимание.

Определение содержания метана и углекислого газа в водохранилищах и их эмиссии в атмосферу актуально не только с точки зрения изучения процессов глобального изменения климата, но и мониторинга качества воды. Газовый режим является важным показателем экологического состояния водных объектов. Содержание метана в водохранилищах зависит от соотношения, с одной стороны, его потока из донных отложений, непосредственного образования в воде, поступления с поверхности водосбора, в том числе с притоками и в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, с другой — от окисления метана в воде и его эмиссии в атмосферу [13, 22, 38, 39]. Дополнительным источником углекислого газа являются синезеленые водоросли, цветение которых серьезно ухудшает качество воды в искусственных водоемах [5, 12]. На содержание растворенных газов в воде влияют как естественные факторы, и в первую очередь климатические и гидрологические условия, контролирующие сезонную и суточную динамику физико-химических и биохимических процессов, так и антропогенное воздействие, накладывающееся на природные факторы

и процессы [6, 15, 33]. В водохранилищах также возможен дополнительный сток метана и углекислого газа в атмосферу через турбины ГЭС и плотины [25, 40].

Наибольшее количество полевых наблюдений за концентрацией и эмиссией парниковых газов, в частности метана, накоплено о водоемах Канады, США, Бразилии [34, 37, 42], в то время как водохранилища РФ в этом отношении изучены недостаточно [32].

Метан образуется в строго анаэробных условиях за счет деятельности метаногенных архей (одноклеточных микроорганизмов, не имеющих ядра) и окисляется метанотрофными микроорганизмами как в аэробных, так и в анаэробных условиях [20]. При этом эмиссия метана может происходить как за счет диффузионного, так и пузырькового потоков [13, 29, 32, 45]. Для некоторых водоемов актуально учитывать поток метана при разложении макрофитов. Также возможен поток метана в атмосферу при сезонном поступлении накопленных за периоды стратификации запасов метана в гипolimнионе (слабоперемешанном придонном слое) при наступлении периодов конвекции [9, 43].

Так как метан — продукт анаэробного разложения органического вещества, а повышение температуры воды интенсифицирует деятельность микроорганизмов, то его эмиссия из водохранилищ зависит от этого показателя [41]. Метаногенные археи гораздо более чувствительны к температуре среды, чем метанотрофные микроорганизмы [19], а оптимальная температура для производства метана и его окисления составляет около 25 °C. В умеренном поясе удельный поток метана с водохранилищ меняется от 0.1 до 108.5 мгCH₄/(м²·сут), в субтропическом поясе — от 9.9 до 75 мгCH₄/(м²·сут), в субэкваториальном — от 10 до 1140 мгCH₄/(м²·сут) [47]. Такой разброс значений указывает на то, что климат не является доминирующим фактором, влияющим на эмиссию метана, но тем не менее в более низких широтах значения удельного потока метана больше, чем в умеренных.

Немаловажным фактором является глубина водоема: метан в большем объеме попадает в атмосферу из мелководных частей акватории, чем из глубоководных. Это происходит из-за того, что при меньшем расстоянии между поверхностью и донными отложениями окисляется меньшее количество метана. В результате диффузионные потоки метана в мелководных районах значительно больше, чем в глубоководных [35, 40]. Возникновение пузырькового переноса наблюдается реже [13], но образование пузырьков также более вероятно в областях с глубиной менее 10 м [35].

Эмиссия метана на границе воздух—вода положительно коррелирует с его концентрациями в поверхностном слое, а они в свою очередь зависят от внутрисезонного режима растворенного кислорода в толще воды, который определяется гидродинамическими и продукционно-деструкционными процессами [11]. Размеры бескислородных зон, наблюдаемых практически ежегодно зимой и в период летней стагнации в слабопроточных водоемах, изменяются в зависимости от сезонных гидрометеорологических условий. Осеннее перемешивание приводит к выравниванию содержания растворенного кислорода по глубине, а зимой вновь формируется кислородная стратификация. Таким образом, значительная сезонная и межгодовая изменчивость кислородного режима в малопроточных водохранилищах в значительной степени определяет и масштабы пространственно-временной изменчивости эмиссии метана с их поверхности. Для водохранилищ с интенсивным водообменом, в которых происходит не многолетнее, а лишь сезонное регулирование стока, образование анакисдных условий малохарактерно.

На эмиссию метана через изменение коэффициента обмена (К) на границе воздух—вода влияют скорость ветра, разница температуры между водой и воздухом, течения и связанное с ними вертикальное перемешивание [28, 36]. Кроме того, выбросы метана из водохранилищ зависят от особенностей затопленной зоны, возраста водоема, поступления органики с притоками [31], первичной продукции водных растений, погодных условий и морфометрических особенностей.

Цель настоящей работы — сравнить пространственно-временное распределение содержания в водной толще и удельных потоков метана в двух разнотипных водоемах на примере Можайского и Горьковского водохранилищ.

Объекты исследования и методы измерений. Можайское водохранилище образовано в верховьях р. Москвы в 1961 г. и входит в состав москворецкой системы водоснабжения Москвы для коммунально-бытовых и производственных нужд (рис. 1). Это небольшое морфологически простое водохранилище долинного типа с вытянутой продольной осью и асимметричным профилем донного рельефа. Водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока р. Москвы и характеризуется слабым водообменом с коэффициентом 1.15 год^{-1} . Средняя биомасса фитопланктона составляет $4.5\text{—}6 \text{ мг/л}$ (большие значения характерны для верховьев водоема). Можайский район считается одним из самых экологически чистых районов Московской области, однако обильное использование удобрений два десятилетия назад привело к накоплению биогенных элементов в донных отложениях водохранилища, что способствует вспышкам цветения водорослей в жаркую погоду при достаточно низком уровне воды [8, 17].

Горьковское водохранилище заполнено в 1957 г. и имеет сложную конфигурацию (рис. 2). От г. Рыбинска до устья р. Елнати (337 км) выделяют русловую часть, ниже до плотины Нижегородской ГЭС (90 км) расположено озеровидное расширение [21]. Это водохранилище сезонного регулирования стока с высокой проточностью и коэффициентом водообмена 5.41 год^{-1} [3, 7, 24]. Воды Горьковского водохранилища принадлежат к разряду слабо загрязненных. Наиболее эффективно их самоочищение происходит в макрофитных прибрежных биоценозах [4]. По современной оценке, Горьковское водохранилище является водоемом умеренного цветения со средним и максимальным измеренным содержанием биомассы фитопланктона, соответственно 63 и 586 г/м^3 [10, 14, 18]. Основные характеристики водохранилищ приведены в табл. 1.

В 2015—2017 гг. на Можайском водохранилище в период открытой воды производились измерения поверхностной плотности потоков метана методом плавучих камер (от 4 до 13 раз за сезон), регулярный отбор проб воды из поверхностного и придонного горизонтов на рейдовой вертикали IV (рис. 1) в Красновидовском плесе (10—20 раз за сезон) и при периодических гидролого-гидрохимических съемках по продольной оси водохранилища (от 5 до 10 станций 3—5 раз в сезон) [9]. Отбор проб производится на станциях, расположенных как над затопленным руслом (рис. 1), так и над соседней затопленной поймой, которые отличаются характером грунта и скоростью потребления кислорода [2].

На Горьковском водохранилище исследования газообмена начаты в 2017 г. Отбор проб воды из поверхностного и придонного горизонтов проводился в весенний (пункты 2, 7, 14) и летний периоды: в июне—июле (пункты 11, 12) и в августе (все пункты на рис. 2), постановка плавучей камеры в озерной части осуществлялась 13—17 августа 2017 г.

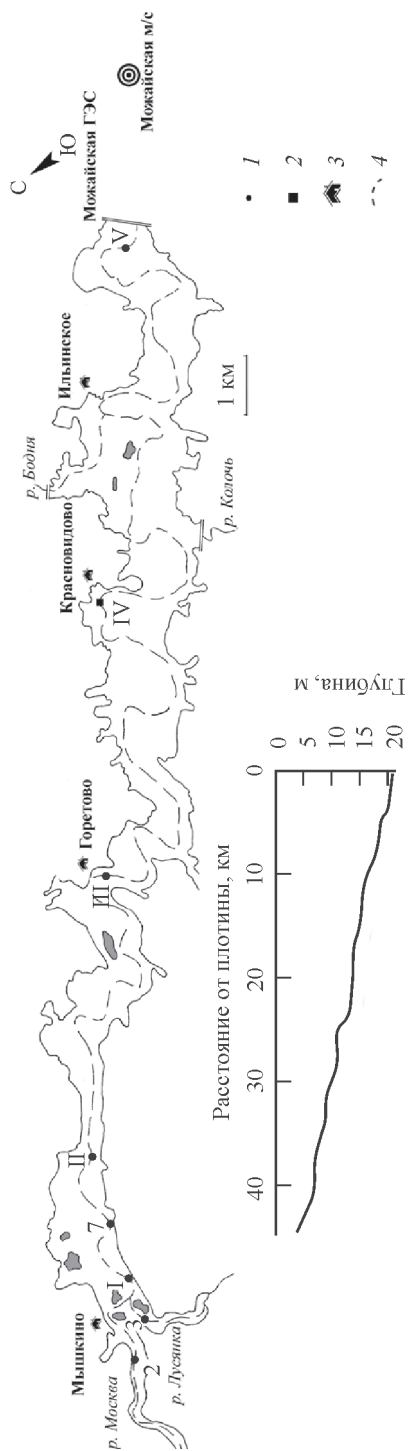


Рис. 1. Схема Можайского водохранилища с пунктами (станциями) отбора проб. Пояснения в тексте.
 1 — пункты отбора проб, 2 — населенные пункты, 3 — пункт постановки плавучей камеры, 4 — затопленная русловая сеть.

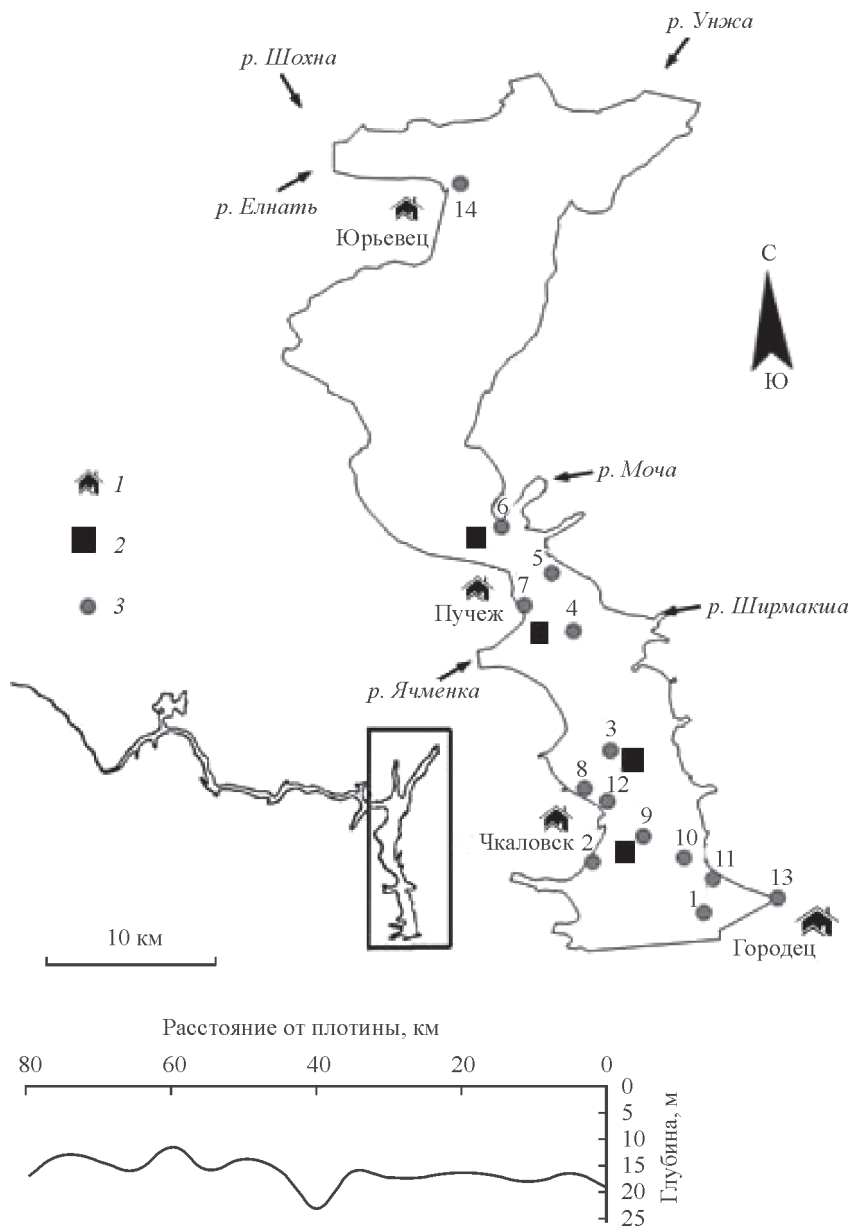


Рис. 2. Схема озерной части Горьковского водохранилища с пунктами отбора проб.
 1 — населенные пункты, 2 — пункты постановки плавучей камеры, 3 — пункты отбора проб.

Для определения содержания растворенных газов используется методика фазово-равновесной дегазации [1]. В основе метода лежит закон Генри, указывающий на прямую пропорциональность между концентрациями летучего соединения в находящихся в равновесии жидкой и газовой фазах. Методом паровозной экстракции выделенная газовая фаза переводится для последующего анализа в стеклянные флаконы для лабораторных исследований [16, 26]: объем пробы воды — 40 мл, воздуха — 20 мл, время встряхивания — 3 мин.

Таблица 1

Основные характеристики Можайского и Горьковского водохранилищ

Характеристика	Можайское водохранилище	Горьковское водохранилище
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м над ур. м.	183	84
Площадь зеркала водохранилища, км ² , в том числе площадь озерной части, км ²	30.7 —	1591 1008
Наибольшая глубина, м	23	22
Средняя глубина, м	7	5.5
Полный объем, км ³	0.235	8.82
Полезный объем, * км ³	0.221	2.78
Коэффициент водообмена, 1/год	1.15	6

Примечание. * Полезный объем водохранилища — часть полного объема водохранилища, используемая для регулирования стока, заключенная между нормальным подпорным уровнем и максимальной сработкой водоема (уровнем мертвого объема).

Концентрации метана в воздушных образцах определялись в 2—3-кратной повторности на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» (ЗАО «Хроматэк», г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором.

Поверхностная плотность потока метана измерялась плавучими камерами по методологии, описанной в [26]. Камера устанавливалась с заякоренной лодки или плавучей платформы в пунктах над затопленным руслом, указанных на рис. 1 и 2. Камера удерживалась в частично погруженном (для исключения газообмена с атмосферой) состоянии на плаву поплавками. Рабочий объем камеры составлял 57.6 л, площадь основания — 0.16 м², время экспозиции — от 40 до 60 мин. Температура воды и растворенный в воде кислород определялись одновременно зондом YSI ProODO с погрешностью изменений растворенного кислорода и температуры воды 0.1 мг/л и 0.2 °C соответственно. Для расчетов потоков метана использовались данные о скорости ветра с автоматической метеостанции DAVIS, измерявшей скорость ветра над водоемом, установленной на плавучей платформе. При пропусках наблюдений на Можайском водохранилище 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, [46]) с использованием параметризации коэффициента обмена по [28]. Этот метод использует градиенты концентрации газа в поверхностном водном слое и полуэмпирические уравнения для косвенной оценки потока этого газа.

Результаты и обсуждение. Измерения на Можайском водохранилище выявили большую внутрисезонную изменчивость содержания метана в поверхностном и придонном слоях этого мезотрофно-эвтрофного водоема, связанную с развитием бескислородных условий в гипolimнии при небольшом времени водообмена (рис. 3). Начало периода весенне-летнего нагревания в 2015 г. было дождливым и ветреным. Средняя устойчивость на рейдовой вертикали составляла менее 0.1 кг/м⁴. У дна в приплотинном плесе содержание растворенного кислорода достигало 4 мг/л. К 1 июля 2015 г. после периода теплой штилевой погоды сформировался гипolimнион, в котором наблюдался

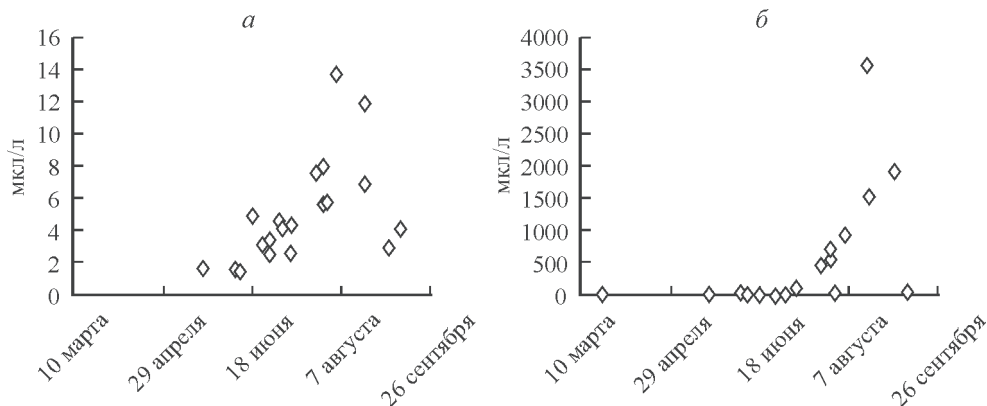


Рис. 3. Содержание метана (мкл/л) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях Красновидовского плеса (ст. IV, см. рис. 1) Можайского водохранилища в 2017 г.

дефицит кислорода. Его содержание менее 1 мг/л было измерено ниже горизонтов 5 и 10 м в верховьях и у плотины соответственно. К августу 2015 г. за период с циклонической погодой в конце июля произошло перемешивание, которое размыло и углубило слой температурного скачка почти до 9—10 м, но не разрушило его полностью, поэтому бескислородные условия в придонных горизонтах глубоководных районов сохранились. Содержание кислорода менее 1 мг/л наблюдалось ниже горизонтов 7 и 10 м в верховьях и у плотины соответственно. Более глубокое растространение азрированных слоев в центральном и приплотинном районах связано с большей длиной разгона ветра и более интенсивным перемешиванием, нежели в узких верховьях с залесенными берегами.

В 2016 г. июнь был теплым и безветренным, в результате чего наблюдались высокие значения устойчивости (1.5 кг/м^4) и устойчивый (с градиентом около $3 \text{ }^\circ\text{C/м}$) температурный скачок на глубине 5—6 м. К июлю 2016 г. значительные синоптические изменения отсутствовали, происходило образование и разрушение суточных и синоптических температурных скачков, вызванных незначительными дневными и ночными изменениями температуры, что только усиливало стратификацию водной толщи. Устойчивость на ст. IV максимальна за все периоды наблюдений — 1.7 кг/м^4 . Содержание кислорода менее 1 мг/л наблюдалось ниже глубины 7 м. В конце августа верхний район водохранилища был перемешан до дна, и бескислородные условия сохранились в центральном и приплотинном районе ниже горизонтов 8—10 м.

По сравнению с предшествующими сезонами лето 2017 г. было холодным; особенно низкие для этого времени температуры наблюдались в мае—июне ($5\text{—}10 \text{ }^\circ\text{C}$ в ночные часы), в это же время выпадало большое количество осадков и скорость ветра достигала 15 м/с. Такая синоптическая обстановка не дала развиваться устойчивой, классической для летнего времени стратификации в водоеме, с выраженным эпи-, гипо- и металимнионом, сглаживая температурные и плотностные градиенты вплоть до середины июля. Тем не менее бескислородные условия установились со второй декады июля и продолжались до конца августа. Разрушение устойчивой стратификации в 2015 г. наблюдалось в конце второй декады августа, в 2016 и 2017 гг. — в конце третьей декады августа.

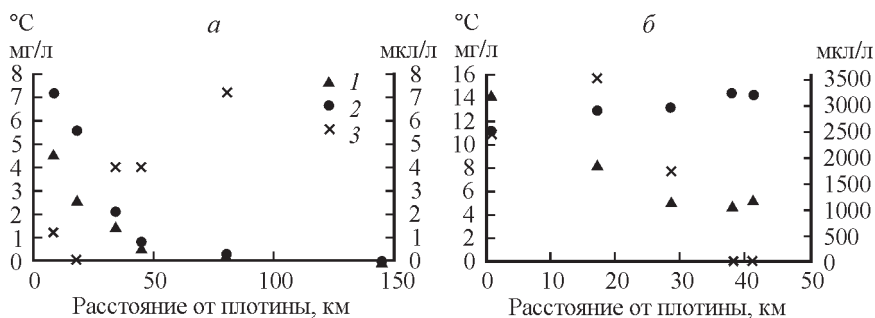


Рис. 4. Продольное изменение разности значений температуры воды, концентрации растворенного кислорода (мг/л) и содержания метана (мкл/л) в поверхностном и придонном слоях: *а* — Горьковского водохранилища 13—15.08.2017 г.; *б* — Можайского водохранилища 20.08.2017 г.

1 — ΔT , °C; 2 — ΔO_2 , мг/л, 3 — ΔCH_4 мкл/л.

В отличие от слабопроточного Можайского водохранилища в августе 2017 г. стратификации водной массы и бескислородных условий в озерной части Горьковского водохранилища не наблюдалось. В Горьковском водохранилище продольное изменение температуры воды и разности концентрации растворенного кислорода на период экспедиционных исследований приведено на рис. 4, *а*. Водная толща была стратифицирована только у плотины (ниже г. Чкаловска), содержание кислорода в придонном горизонте не опускалось ниже 3.5 мг/л. Выше г. Чкаловска разность поверхностной и придонной температуры воды не превышала 2.5 °C. На речном участке (г. Решма) различия характеристик по глубине отсутствовали.

На ст. IV Можайского водохранилища (станция с наиболее частым отбором проб) наибольшая концентрация метана в поверхностном и придонном слоях отмечается в августе перед разрушением прямой стратификации. В верховьях содержание метана 20 августа из-за предыдущего похолодания при перемешивании было однородным, несмотря на значительную кислородную стратификацию, обусловленную вспышкой цветения и пересыщением у поверхности (рис. 4, *б*). В сентябре при перемешивании водной толщи до дна содержание метана в придонном горизонте и на поверхности снизилось до величин, характерных для первой трети лета (не более 10 мкл/л), когда бескислородные условия в придонных горизонтах еще отсутствуют.

Аналогичные изменения во времени показывают результаты анализа проб воды, отобранных в ходе гидрологических съемок вдоль водоема. Содержание метана в поверхностном слое относительно мелководного (10—12 м) центрального района (ст. III) может повышаться до 60 мкл/л (рис. 5, *а*) при перемешивании бескислородной зоны и краткосрочном разрушении стратификации в циклоническую погоду. При дальнейшем нагревании бескислородные условия у дна восстанавливаются, и к концу лета содержание метана у дна в центральном районе уже превышает 1500 мкл/л (рис. 5, *в*). В приплотинном районе с наибольшими глубинами до 18—20 м наблюдается рост содержания метана в поверхностном слое до 10 мкл/л к концу периода устойчивой стратификации (рис. 5, *б*), однако при глубине более 20 м перемешивание в течение лета придонных горизонтов не достигает, поэтому эпизодических выбросов накопившегося у дна метана не наблюдается (рис. 5, *з*).

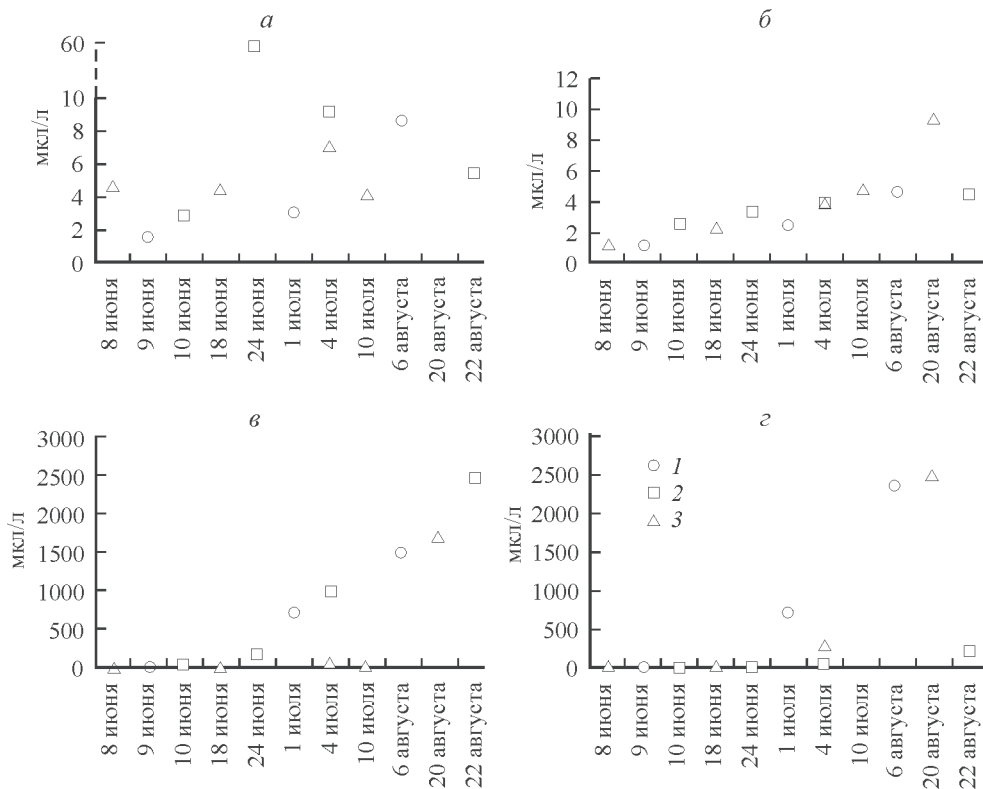


Рис. 5. Содержание метана (мкл/л) в поверхностном (а — станция III, б — станция V) и придонном (в — станция III, г — станция V) слоях Можайского водохранилища по данным гидрологических съемок 2015—2017 гг.

Символы, соответствующие разным годам, даны на рис. г: 1 — 2015, 2 — 2016, 3 — 2017 гг.

Для ст. IV глубиной 13—14 м с наиболее частыми измерениями удельного потока метана методом плавучих камер (до 20 в летний сезон 2017 г.) характерной закономерностью является увеличение его значений в течение периода стратификации (рис. 6). Пузырьковый поток превышает диффузионный поток на порядок в течение всего лета, так как пузырьки метана гораздо менее подвержены окислению, и составляет более 95 % общего потока метана.

По результатам измерений плавучими камерами выявлено значительное увеличение эмиссии метана к моменту окончания периода летней стратификации в августе, когда бескислородная зона достигает наибольшего объема, стратификация разрушается при перемешивании, а градиент температуры в водной толще исчезает. В начале периода осенней конвекции поток метана, определенный методом плавучих камер, уменьшается на порядок (рис. 6).

Результаты расчета диффузионного удельного потока для станций на Можайском водохранилище, расположенных вдоль затопленного русла, по материалам пяти гидрологических съемок 2017 г. приведены в табл. 2. Колебания значений диффузионного потока на станциях II—IV (уменьшение к 4 июля)

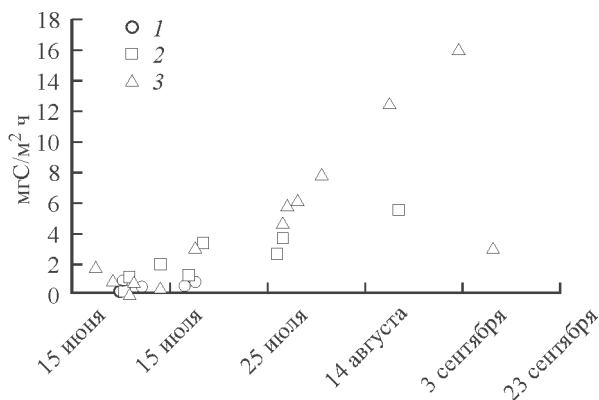


Рис. 6. Поверхностная плотность потока метана ($\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$), определенная методом плавучих камер на ст. IV Можайского водохранилища по данным 2015—2017 гг.
1 — 2015, 2 — 2016, 3 — 2017 гг.

связаны с синоптической ситуацией, когда толща воды была перемешана и толщина аэрированного эпилимниона увеличилась с 2—3 до 4—5 м. В целом же характерно увеличение значений потока метана в течение летнего периода для всех районов водохранилища, отличающихся средней глубиной. Также проявляется тенденция уменьшения диффузионного потока метана при приближении к плотине. Это связано с влиянием фактора глубины (окисление метана происходит в большей толще аэрированной воды при наличии более глубокого перемешанного эпилимниона).

Несмотря на значительные концентрации метана в придонных горизонтах, его содержание у поверхности стратифицированного Можайского водохранилища невелико даже в августе и значительная эмиссия метана возможна в периоды разрушения стратификации при вовлечении придонных горизонтов в перемешивание в период полной конвекции, которая происходит при асимметричном профиле водоема в разных районах акватории не одновременно. Для дальнейшего изучения данного процесса необходимы непрерывные на-

Таблица 2*
Диффузионный удельный поток метана в 2017 г., рассчитанный методом TBL,
 $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ сут})$

Станция (рис. 1) и характерная глубина района акватории	8 июня	18 июня	4 июля	10 июля	20 августа
I (6 м)	2.3	—	5.3	13	11.2
II (8 м)	1.2	4.7	2.3	6	19.7
III (10 м)	1.5	4.5	3	3	13.6
IV (14 м)	0.6	2.8	1.5	2	10.3
V (20 м)	0.4	1.2	1.6	3	4.3

Примечание. * Пояснения в тексте.

блюдения за содержанием метана в поверхностном слое водоема с установкой автономных логгеров и мачты для измерения потока метана прямым пульсационным методом в приводном слое воздуха.

В приплотинном плесе (ст. V) диффузионный поток на порядок меньше, чем в верховьях. В конце августа довольно большие значения характерны для ст. IV, отличающейся от ст. V глубиной и термической структурой. Следовательно, при расчете интегральной эмиссии с поверхности водохранилищ необходимо учитывать пространственно-временные изменения значений потока метана, которыми отличаются водохранилища долинного типа. К такому типу относится большинство искусственных водоемов, а в России долинные водохранилища емкостью более 10 млн м³ составляют 82 % от общего числа водохранилищ [23].

В поверхностном слое озерной части Горьковского водохранилища среднее содержание метана составило 5.1 мкл/л (от 3.5 до 6.9 мкл/л), а в придонном — 8.3 (от 3.6 до 12.6 мкл/л). Если последнее значение отличается от аналогичных данных для Можайского водохранилища на три порядка, то содержание в поверхностном слое сопоставимо только с наиболее глубоководным приплотинным плесом Можайского водохранилища, поскольку в остальной его части с глубинами менее 15 м содержание метана в поверхностном слое 20 августа возрастало к верховьям (рис. 1, ст. I и II) от 12 до 24 мкл/л.

По результатам установки плавучих камер существенных пространственных различий потока метана в озерной части Горьковского водохранилища за период экспедиционных наблюдений не выявлено, а его значения изменялись от 0.2 до 1.6 мг C-CH₄/(м²·ч), что значительно меньше потока метана в августе на Можайском водохранилище (более 10 мг C-CH₄/(м²·ч)).

Значения диффузионного удельного потока метана, рассчитанные методом TBL для Горьковского водохранилища, за период экспедиционных наблюдений составили в среднем 0.18 мг C-CH₄/(м²·ч) (от 0.08 мг C-CH₄/(м²·ч) 13 августа) до 0.27 мг C-CH₄/(м²·ч) 15 августа) на фоне увеличения максимальной скорости ветра в сроки отбора проб с 4.3 м/с до 13.3 м/с. На Можайском водохранилище средние расчетные значения диффузионного удельного потока за летний период наблюдений составили: в верховьях (ст. I) — 0.38 мг C-CH₄/(м²·ч), а у плотины (ст. V) — 0.12 мг C-CH₄/(м²·ч) в среднем за сезон.

Значения диффузионного потока метана разнотипных водохранилищ различаются незначительно, поскольку кислородный барьер в слабопроточном водохранилище при наличии стратификации препятствует диффузионному переносу. Причем в периоды антициклонической погоды в конце лета развитие фитопланктона увеличивает поступление автохтонной органики в придонные слои, где она разлагается, увеличивая содержание метана. Одновременно с этим активные продукционные процессы приводят к пересыщению фотического слоя кислородом, который частично поступает в атмосферу путем эвазии, а частично переносится в более глубокие слои при ветровом и конвективном перемешивании.

При интерполяции полученных значений и расчете потока метана методом [28] для Можайского водохранилища среднее его значение за год составляет [28] 45 мг C-CH₄/(м²·сут), что соответствует верхней границе значений для водоемов умеренной зоны [47] и подтверждает предположение, высказанное в работе [30] о том, что величина эмиссии метана с водохранилищ умеренных и тропических широт может быть одного порядка.

Выводы

Изучение эмиссии метана на примере Горьковского и Можайского водохранилищ выявило принципиальные различия режима метана для водоемов, находящихся в одной природной зоне, но различающихся гидрологическим режимом.

Пространственная неоднородность содержания метана в проточном Горьковском водохранилище отсутствует. Для слабопроточного Можайского водохранилища характерна большая внутрисезонная изменчивость содержания метана в поверхностном и особенно в придонном слоях, связанная с развитием бескислородных условий.

Выявлено увеличение содержания метана в поверхностном и придонном горизонтах Можайского водохранилища в течение сезона на один и три порядка соответственно.

Содержание метана определяется сменой синоптической ситуации, определяющей глубину ветрового перемешивания и благоприятные условия для развития фитопланктона. Выделение кислорода при продукции органического вещества и его перераспределение в водной толще при перемешивании создает барьер для выделения метана в атмосферу даже при значительном его содержании в бескислородном гипolimнии.

В водохранилище сезонного регулирования стока при отсутствии бескислородных условий в придонном горизонте содержание метана на два порядка меньше, чем в слабопроточном, но при этом на поверхности имеет один порядок при сравнении с приплотинным районом слабопроточного водохранилища (около 10 мкл/л).

По материалам постановки плавучих камер выявлено увеличение эмиссии метана в слабопроточном водохранилище к моменту окончания периода летней стратификации (с 1—2 до 10—16 мг $C-CH_4/(m^2 \cdot ч)$). В начале периода осенней конвекции эмиссия, определенная методом плавучих камер, уменьшается на порядок.

По результатам установки плавучих камер существенных пространственных различий потока метана в водохранилище сезонного регулирования за период экспедиционных наблюдений не выявлено, а его значения в августе на порядок меньше общего потока метана слабопроточного водохранилища (0.5—1.5 мг $C-CH_4/(m^2 \cdot ч)$).

Значения диффузионного потока для обоих водоемов имеют один порядок и изменяются незначительно (0.1—0.4 $C-CH_4/(m^2 \cdot ч)$).

Это показывает, что результаты эпизодических экспедиционных наблюдений на слабопроточных водохранилищах нельзя использовать для оценки характерных значений сезонной и годовой эмиссии парниковых газов.

К числу факторов пространственно-временной изменчивости потока метана относятся: глубина отдельных участков, которая зависит от морфометрических особенностей и уровня режима искусственного водоема; синоптические условия, которые в сочетании с морфометрическими особенностями (длина разгона ветра, характер рельефа местности и растительности) определяют особенности гидрологического режима и термическую структуру; содержание растворенного кислорода, которое в большой степени зависит от продукционно-деструкционных процессов. Обратная связь проявляется в том, что большое количество автохтонной органики в свою очередь является потребителем кислорода не толь-

ко в придонном слое, но и в толще воды, и источником метана при разложении.

Разнообразие гидрологической структуры искусственных водоемов, сочетание их проточности и трофического статуса при немногочисленных натурных данных о значениях эмиссии метана ставят задачу более детального натурального изучения водохранилищ и привлечения математического моделирования процессов метаногенеза и эмиссии парниковых газов [44].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-РГО 17-05-41095.

Список литературы

- [1] *Большаков А. М., Егоров А. В.* Результаты газометрических исследований в Карском море // *Океанология*. 1995. Т. 35, № 3. С. 399—404.
- [2] *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.
- [3] *Буторин Н. В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
- [4] *Вода России. Водохранилища* / Под науч. ред. А. М. Черняева. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. 700 с.
- [5] *Гавриловский Д. В.* Экологические проблемы Цимлянского водохранилища // *Новая наука: Теоретический и практический взгляд*. 2015. № 6—2. С. 17—19.
- [6] *Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С.* Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // *Изв. вузов. Северо-Кавказский регион*. 2013. № 6. С. 78—82.
- [7] *Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги*. Л., 1975. 292 с.
- [8] *Гидроэкологический режим водохранилищ Подмоскovie (наблюдения, диагноз, прогноз)* / В. В. Пуклаков, Ю. С. Даценко, А. В. Гончаров и др. М.: Перо, 2015. С. 284.
- [9] *Гречушников 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] *Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н., Сергиевская И. А., Андриянова Н. В.* О возможностях радиолокационной диагностики зон эвтрофирования водоемов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 3. С. 336—343.
- [11] *Ерина О. Н.* Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы // *Дис. ... канд. геогр. наук*. М.: МГУ, 2015. 188 с.
- [12] *Зайцева Н. В.* Проблема развития синезеленых водорослей в Воткинском и Ижевском водохранилищах // *Современные научные исследования и инновации*. 2014. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/36048>.
- [13] *Зорькин Л. М., Суббота М. И., Стадник Е. В.* Метан в нашей жизни. М.: Недра, 1986. 149 с.
- [14] *Леднёв В. Н., Гришин М. Я., Першин С. М., Бункин А. Ф., Капустин И. А., Мольков А. А., Ермаков С. А.* Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 1. С. 119—134.

- [15] Метан в водных экосистемах / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша, В. О. Хорошевская. Ростов-на-Дону; М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
- [16] Методические указания. Методика выполнения измерений концентрации метана в водах паровым газохроматографическим методом. РД 52.24.512-2002.
- [17] Можайское водохранилище. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1979. 400 с.
- [18] *Оханкин А. Г., Микульчик И. А., Корнева Л. Г., Минеева Н. М.* Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти, 1997. 156 с.
- [19] Плотины и развитие: новая методическая основа для принятия решений. Отчет Всемирной комиссии по плотинам. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2009. 200 с.
- [20] *Саввичев А. С., Русанов И. И., Юсупов С. К.* и др. Биогеохимический цикл метана в прибрежной зоне и литорали Кандалакшского залива Белого моря // Микробиология. 2004. Т. 73, № 4. С. 540—552.
- [21] *Соболь С. В.* Оценка геоэкологических последствий создания и многолетней эксплуатации равнинного Горьковского водохранилища на р. Волге // Приволжский научный журнал. 2016. № 1. С. 88—96.
- [22] *Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О.* Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону; М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
- [23] *Эдельштейн К. К.* Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.
- [24] Экологические проблемы верхней Волги/ Отв. ред. А. И. Копылов. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
- [25] *Barros N., Cole J. J., Tranvik L. J., Prairie Y. T., Bastviken D., Huszar V. L. M., del Giorgio P., Roland F.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // Nat. Geosci. 2011. V. 4. P. 593—596.
- [26] *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. doi:10.1029/2004GB002238.
- [27] *Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // Ecosystems. 2007. V.10, N 1. P. 172—185.
- [28] *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. doi:10.4319/lo.1998.43.4.0647.
- [29] *Demarty M., Bastien J., Tremblay A., Hesslein R. H., Gill R.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Quebec, Canada, measured with automated systems // Environmental Science & Technology. 2009. V. 43. P. 8908—8915.
- [30] *Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., Beaulieu J. J., Delsontro T., Barros N., Bezerra-Neto J. F., Powers S. M., dos Santos M. A., Vonk J. A.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. BioScience. 2016. V. 66, N 11. P. 949—964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>.
- [31] *Dunfield P., Dumont R., Moore T. R.* Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH // Soil Biology and Biochemistry. 1993. V. 25 (3). P. 321—326.
- [32] *Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I., Sidorenko G. I., Chusov A. N., Atrashe-nok V. P., Molodtsov D. V., Savvichev A. S., Zinchenko A. V.* Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49, N 1. P. 33—36. doi: 10.1007/s10749—015—0569—3/.
- [33] *Giles J.* Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. V. 444. P. 524—525.

- [34] Global Reservoir and Dam (GRanD) database Technical documentation http://www.gwsp.org/fileadmin/downloads/GRanD_Technical_Documentation_v1_1.pdf.
- [35] *Goldenfum J. A.* GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs // IHA: UK, 2010. P. 36—91.
- [36] Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs: World Bank Report — January, 2010. <https://siteresources.worldbank.org/INTNTFPSI/Resources/GHGemissionsrelatedtofreshwaterreservoirs.pdf>.
- [37] *Lehner B., Döll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrol.* 2004. V. 296. P. 1—22.
- [38] *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. V. 13. P. 1381—1386.
- [39] *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.* 2000. V. 50. P. 766—775.
- [40] *Roehm C., Tremblay A.* Role of turbins in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Quebec, Canada // *Journal of Geophysical Reseach.* 2006. V. 11. D24101, doi:10.1029/2006JD007292.
- [41] *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. V. 66, N 1—2. P. 9—21.
- [42] *Dos Santos M. A., Matvienko B., Rosa L. P., Sikar E., dos Santos E. O.* Gross Greenhouse Gas Emissions from Brazilian Hydro Reservoirs // *A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (eds). Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes. Environmental Science. Springer, Berlin: Heidelberg, 2006. Doi: 10.1007/978-3-540-26643-3_12.*
- [43] *Sherman B., Ford P., Hunt D., Drury C.* Reservoir methane monitoring and mitigation — Little Nerangand Hinze Dam Case Study // *Urban Water Security Research Alliance Technical Report.* 2012. N 96. 76 p.
- [44] *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. V. 9. P. 1977—2006. [https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977—2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016).
- [45] *Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. (eds). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series. New York: Springer, 2005. 732 p.*
- [46] UNESCO/The International Hydropower Association. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs / *Goldenfum J. A., ed. London, UK, 2010.*
- [47] *Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs // *C. Tortajada, D. Altinbilek, A. Biswas (eds). Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin: Heidelberg, 2012. P. 69—94.*
- [48] *Williamson C. E., Saros J. E., Vincent W. F., Smold J. P.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // *Limnology and Oceanography.* 2009. V. 54, N 6, part 2. P. 2273—2282.

Поступило в редакцию
20 апреля 2018 г.

Spatio-temporal change of methane distribution and emission in reservoirs with different water residence coefficient

© M. G. Grechushnicova,^{*,**1} I. A. Repina,^{*,***2} V. M. Stepanenko,^{*3}
V. S. Kazantsev,^{****4} A. Yu. Artamonov,^{****5} M. I. Varentsov,^{*,***6} D. V. Lomova,^{**7}
A. A. Molkov,^{****8} I. A. Kapustin^{****9}

* M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

** Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

*** A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

**** Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

E-mail: ¹ allavis@mail.ru

² repina@ifaran.ru

³ stepanen@srcc.msu.ru

⁴ stepanen@srcc.msu.ru

⁵ sailer@ifaran.ru

⁶ mvar91@gmail.com

⁷ floraint@yandex.ru

⁸ wave3d@mail.ru

⁹ kapustin-i@yandex.ru

The work concerns questions of time-spatial changes of contents and emission of methane from a surface of polytypic reservoirs. On the basis of comparison of the field observations on the Mozhaisk and Gorky reservoirs the distinctions of contents and specific fluxes of methane for reservoirs with various water residence time and hydrological regime are shown. The Gorky reservoir is characterized by a much smaller spatial variability in the methane content than in the weakly flowing Mozhaisk reservoir and its relatively small concentrations due to the shorter time of water exchange that affects the hydrological regime. The methane content in the lake part of the Gorky reservoir in August 2017 in the surface layer was 3.5–7 µl/l, in the bottom layer — 3.6–12.6 µl/l, while in Mozhaisk reservoir — 12–24 and more than 1500 µl/l, respectively. According to the results of the installation of floating chambers in mid-August 2017, the methane flux in the lake part of the Gorky reservoir did not exceed 1.6 mg C-CH₄/(m²·hour), while at the Mozhaisk reservoir it was more than 10 mg C-CH₄/(m²·hour). Comparison with literary data has shown that emission rate from reservoirs of a boreal zone with slow water exchange can be underestimated.

Key words: reservoirs, hydrological regime, water residence, methane, diffusive flux, bubble emission.

References

- [1] Bol'shakov A. M., Egorov A. V. Rezul'taty gazometricheskikh issledovaniy v Karskom more // *Okeanologiya*. 1995. T. 35, N 3. S. 399—404.
- [2] Brehovskih V. F., Vishnevskaja G. N., Kremeneckaja E. R., Lomova D. V. Ob ocenke potrebleniya kisloroda raznymi tipami gruntov dolinnykh vodohranilishh v letnij period // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2006. N 10. S. 82—91.
- [3] Butorin N. V. *Gidrologicheskie processy i dinamika vodnykh mass v vodohranilishhah Volzhskogo kaskada*. L.: Nauka, 1969. 322 s.
- [4] Voda Rossii. *Vodohranilishha / Pod nauch. red. A. M. Chernjaeva*. Ekaterinburg: Akva-Press, 2001. 700 s.
- [5] Gavrilovskij D. V. *Jekologicheskie problemy Cimljanskogo vodohranilishha* // *Novaja nauka: Teoreticheskij i prakticheskij vzgljad*. 2015. N 6—2. S. 17—19.
- [6] Gar'kusha D. N., Fedorov Ju. A., Tambieva N. S. *Metan kak indikator uslovij rannego diageneza i jekologicheskogo sostojanija vodnykh jekosistem* // *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region*. 2013. N 6. S. 78—82.
- [7] *Gidrometeorologicheskij rezhim ozer i vodohranilishh SSSR*. *Vodohranilishha Verhnej Volgi*. L., 1975. 292 s.
- [8] *Gidrojekologicheskij rezhim vodohranilishh Podmoskov'ja (nabljudeniya, diagnoz, prognoz)* / V. V. Puklakov, Ju. S. Dacenko, A. V. Goncharov i dr. M.: Pero, 2015. S. 284.

- [9] Grechushnikova M. G., Badjukov D. D., Savvichev A. S., Kazancev V.S. Sezonnye i prostranstvennye izmenenija sodержaniya metana v Mozhayskom vodohranilishhe v letnij period // Meteorologija i gidrologija. 2017. N 11. S. 67—78.
- [10] Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaja I. A., Andrijanova N. V. O vozmozhnostjah radiolokacionnoj diagnostiki zon jevtrofirovaniya vodoemov // Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2013. T. 49, N 3. S. 336—343.
- [11] Erina O. N. Rezhim rastvorennogo kisloroda v stratificirovannyh vodohranilishhah Moskvoreckoj sistemy vodosnabzhenija g. Moskvy // Dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU, 2015. 188 s.
- [12] Zajceva N. V. Problema razvitija sine-zelenyh vodoroslej v Votkinskom i Izhevskom vodohranilishhah // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. 2014. N 6 [Elektronnyj resurs]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/36048>.
- [13] Zor'kin L. M., Subbota M. I., Stadnik E. V. Metan v nashej zhizni. M.: Nedra, 1986. 149 s.
- [14] Lednjov V.N., Grishin M. Ja., Pershin S. M., Bunkin A. F., Kapustin I. A., Mol'kov A. A., Ermakov S. A. Lidarnoe zondirovanie presnovodnoj akvatorii s vysokoj koncentraciej fitoplanktona // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. T. 13, N 1. S. 119—134.
- [15] Metan v vodnyh jekosistemah / Ju. A. Fedorov, N. S. Tambieva, D. N. Gar'kusha, V. O. Horoshevskaja. Rostov-na-Donu; M.: Rostizdat, 2005. 329 s.
- [16] Metodicheskie ukazaniya. Metodika vypolnenija izmerenij koncentracii metana v vodah parofaznym gazohromatograficheskim metodom. RD 52.24.512—2002.
- [17] Mozhayskoe vodohranilishhe. Kompleksnye issledovaniya vodohranilishh. Vyp. 3. M.: Izd-vo MGU, 1979. 400 s.
- [18] Ohapkin A. G., Mikul'chik I. A., Korneva L. G., Mineeva N. M. Fitoplankton Gor'kovskogo vodohranilishha. Tol'jatti, 1997. 156 s.
- [19] Plotiny i razvitie: novaja metodicheskaja osnova dlja prinjatija reshenij. Otchet Vsemirnoj komissii po plotinam. M.: Vsemirnyj fond dikoj prirody (WWF). 2009. 200 s.
- [20] Savvichev A. S., Rusanov I. I., Jusupov S. K. i dr. Biogeohimicheskij cikl metana v pribrezhnoj zone i litorali Kandalakshskogo zaliva Belogo morja // Mikrobiologija. 2004. T. 73, N 4. S. 540—552.
- [21] Sobol' S. V. Ocenka geojekologicheskikh posledstvij sozdanija i mnogoletnej jekspluatacii ravninnogo Gor'kovskogo vodohranilishha na r. Volge // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2016. N 1. S. 88—96.
- [22] Fedorov Ju. A., Tambieva N. S., Gar'kusha D. N., Horoshevskaja V. O. Metan v vodnyh jekosistemah. Rostov-na-Donu; M.: Rostizdat, 2005. 329 s.
- [23] Jedel'shtejn K. K. Gidrologija ozer i vodohranilishh. M.: Pero, 2014. 399 s.
- [24] Jekologicheskie problemy verhnjej Volgi / Otv. red. A. I. Kopylov. Jaroslavl': Izd-vo JaGTU, 2001. 427 s.
- [25] Barros N., Cole J. J., Tranvik L. J., Prairie Y. T., Bastviken D., Huszar V. L. M., del Giorgio P., Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // Nat. Geosci. 2011. V. 4. P. 593—596.
- [26] 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. doi:10.1029/2004GB002238.
- [27] Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // Ecosystems. 2007. V. 10, N 1. P. 172—185.
- [28] 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. doi:10.4319/lo.1998.43.4.0647.

- [29] *Demarty M., Bastien J., Tremblay A., Hesslein R. H., Gill R.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Quebec, Canada, measured with automated systems // *Environmental Science & Technology*. 2009. V. 43. P. 8908—8915.
- [30] *Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., Beaulieu J. J., Delsontro T., Barros N., Bezerra-Neto J. F., Powers S. M., dos Santos M. A., Vonk J. A.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*. 2016. V. 66, N 11. P. 949—964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>.
- [31] *Dunfield P., Dumont R., Moore T. R.* Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH // *Soil Biology and Biochemistry*. 1993. V. 25 (3). P. 321—326.
- [32] *Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I., Sidorenko G. I., Chusov A. N., Atrashe-nok V. P., Molodtsov D. V., Savvichev A. S., Zinchenko A. V.* Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP // *Power Technology and Engineering*. 2015. V. 49, N 1. P. 33—36. doi: 10.1007/s10749-015-0569-3/.
- [33] *Giles J.* Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. V. 444. P. 524—525.
- [34] Global Reservoir and Dam (GRanD) database Technical documentation http://www.gwsp.org/fileadmin/downloads/GRanD_Technical_Documentation_v1_1.pdf.
- [35] *Goldenfun J. A.* GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs//IHA: UK, 2010. P. 36—91.
- [36] Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs: World Bank Report — January 2010. <https://siteresources.worldbank.org/INTNTFPSI/Resources/GHGemissionsrelatedtofreshwaterreservoirs.pdf>.
- [37] *Lehner B., Döll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrol.* 2004. V. 296. P. 1—22.
- [38] *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. V. 13. P. 1381—1386.
- [39] *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*. 2000. V. 50. P. 766—775.
- [40] *Roehm C., Tremblay A.* Role of turbins in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Quebec, Canada // *Journal of Geophysical Reseach*. 2006. V. 11. D24101, doi:10.1029/2006JD007292.
- [41] *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. V. 66. N 1—2. P. 9—21.
- [42] *Dos Santos M. A., Matvienko B., Rosa L. P., Sikar E., dos Santos E. O.* Gross Greenhouse Gas Emissions from Brazilian Hydro Reservoirs // A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (eds). *Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes*. Environmental Science. Springer, Berlin: Heidelberg, 2006. Doi: 10.1007/978-3-540-26643-3_12.
- [43] *Sherman B., Ford P., Hunt D., Drury C.* Reservoir methane monitoring and mitigation — Little Nerangand Hinze Dam Case Study // *Urban Water Security Research Alliance Technical Report*. 2012. N 96. 76 p.
- [44] *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. V. 9. P. 1977—2006. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>.
- [45] *Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M.* (eds). *Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. Environmental Science Series. New York: Springer, 2005. 732 p.

- [46] UNESCO/The International Hydropower Association. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs / Goldenfum J. A., ed. London, UK, 2010.
- [47] *Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs // C. Tortajada, D. Altinbilek, A. Biswas (eds). Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin: Heidelberg, 2012. P. 69—94.
- [48] *Williamson C. E., Saros J. E., Vincent W. F., Smold J. P.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54, N 6, part 2. P. 2273—2282.

DOI: 10.7868/S0869607118050031

Изв. РГО. 2018. Т. 150, вып. 5

СОЗДАНИЕ ПОДЗЕМНОГО ЭКСКУРСИОННОГО МАРШРУТА В РУСKEАЛЬСКОМ ПРИРОДНОМ ПАРКЕ

© Ю. С. ЛЯХНИЦКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург
E-mail: Yuri_Lyahnitsky@vsegei.ru

Статья посвящена созданию подземных экскурсионных маршрутов на примере «Горного парка Рускеала» (Республика Карелия). В 2009 г. карельский геолог и краевед И. В. Борисов показал автору «Рускеальский провал», который произвел сильное впечатление и побудил автора к исследованию. В 2011 г. было проведено комплексное обследование Рускеальского горного парка. В работах принимала участие большая группа спелеологов РГО. Полученные материалы были представлены заказчику — компании «Колмас Карелия» в виде подробного отчета. В 2012 г. по договору с «Колмас Карелия» Ю. С. Ляхницким и Ю. П. Коренным был составлен проект обустройства подземного пространства для проведения экскурсий. Проект основывался на результатах обследования и предусматривал оборудование двух штолен и крупного наполовину затопленного зала, выработанных при добыче мрамора, для проведения экскурсий. В дальнейшем сделано несколько необходимых дополнений к проекту, так как при разборе завалов выявились не известные ранее особенности. Кроме того, проводился контроль выполнения работ и осуществлялась методическая помощь при их выполнении. В конце 2016 г. обустройство маршрута было завершено и в 2017 г. он начал действовать. В настоящее время по своим эстетическим, познавательным, историко-культурным особенностям подземный маршрут Рускеальского горного парка является одним из лучших в Европе.

Ключевые слова: музей в природе, Карелия, Рускеала, подземный экскурсионный маршрут, познавательный туризм.

Введение. Рускеальское месторождение мрамора находится в северном Приладожье в Республике Карелия. Это одно из старейших месторождений на территории России. Первыми добывать мрамор там начали еще шведы в XVII в., когда регион входил в состав Швеции. Благодаря стараниям пастора С. Алопеуса в Петербурге обратили внимание на минеральные богатства Карелии. В 1764 г. вышел указ Екатерины II «Об учреждении новой ревизии в Финляндии». В 1766 г. в Рускеале началась опытная добыча блоков мрамора.

Описание участка Рускеальского горного парка. Месторождение приурочено к крупной сжатой изоклинальной складке, сложенной амфиболитами и биотит-амфиболитовыми сланцами с прослоями мраморов сортавальской серии нижнего протерозоя. Мощность продуктивного горизонта достигает 600 м. Мраморы месторождений плотные, кристаллические, скарнированы