

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 556.555+547.211

ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

М.Г. Гречушникова¹, В.С. Казанцев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра гидрологии суши

²Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, лаборатория парниковых газов

¹Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: allavis@mail.ru

²Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: kazantsev@ifaran.ru

В статье представлено обобщение материалов комплексных съемок Иваньковского водохранилища, проведенных в 2022–2024 гг. с целью изучения сезонных изменений содержания метана в воде и его эмиссии с поверхности водоема. Съемки включали не только измерение удельного потока метана на границе вода – атмосфера с учетом его пространственной изменчивости, но и измерение выхода метана из донных отложений. Измерения проведены методом камер (плавающих и донных). Обработка проб производилась на хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. При выборе станции измерений учитывалось морфологическое строение водохранилища, тип донных отложений, интервалы глубин.

Измерения показали, что значения удельного потока метана на продольном и поперечных разрезах могут различаться на два порядка. Наименьшие его значения приурочены к участкам с песчаным дном. Наибольшее значение удельного потока метана приурочено к участку со значительной антропогенной нагрузкой (от устья Шошинского плеса до д. Плоски). Показано, что, несмотря на принадлежность Иваньковского водохранилища к группе проточных водохранилищ сезонного регулирования стока согласно классификации по коэффициенту водообмена, при определенных погодных условиях в водоеме возникают участки с дефицитом кислорода. В эти периоды удельный поток метана с таких участков становится сопоставим с потоком метана с малопроточных водоемов. Поэтому снижение проточности в летний период и учащение волн жары являются неблагоприятными факторами в отношении увеличения эмиссии метана. Маловодные периоды при снижении уровня воды относительно нормального подпорного уровня (НПУ) в период навигации также неблагоприятны из-за увеличения удельного потока метана.

Произведено сравнение полученных значений удельного потока метана с литературными данными, показаны значительные различия величин для весеннего периода. Предложена методика оценки эмиссии метана с водохранилища с учетом факторов, определяющих его удельный поток. Показаны сезонные изменения эмиссии, обосновано учащение проведения измерений и необходимость измерений потока метана над разнотипными макрофитами.

Ключевые слова: донные отложения, растворенный кислород, температура воды, водообмен, синоптические условия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.1

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования эмиссии метана из искусственных водоемов связана с малой изученностью данного вопроса в РФ и отсутствием регулярных наблюдений подобного рода. Первые исследования эмиссии метана с водохранилищ проводились в Канаде с 1990-х гг., а впоследствии в Бразилии и США. В 2006 г. МГЭИК указала на необходимость исследования этой составляющей в общей эмиссии метана с пресноводных объектов. По оценкам [Rosentreter et al., 2021] вклад эмис-

сии метана с искусственных водоемов мира оценен в 8,8–28,4 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$, что составляет значимую долю от суммарной эмиссии с естественных озер мира (23–142 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$). Подобные глобальные оценки основываются на анализе данных по изученным водохранилищам, число которых мало по сравнению с общим количеством водохранилищ в мире [Deemer et al., 2016]. В более ранних оценках данные об эмиссии метана с водохранилищ России не учитывались из-за малочисленности измерений, за исключением Саяно-Шушенского и Майнского

водохранилищ [Fedorov et al., 2014]. Наличие крупных водохранилищ на территории РФ ставит задачи определения характерных масштабов эмиссии не только для уточнения глобальных оценок, но и для характеристики углеродной нейтральности деятельности энергогенерирующих компаний. Компания ПАО «Русгидро» инициировала и поддержала исследования на некоторых водохранилищах, находящихся в ее управлении [Fedorov et al., 2015; Репина и др., 2022], что значительно расширило банк мировых данных и позволило заполнить отсутствие данных на территории Сибири и Дальнего Востока. В настоящее время в Российской Федерации реализуется важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» для получения достоверных и международно-признаваемых научных данных для оценки антропогенных и природных потоков климатически активных веществ на территории Российской Федерации, а также организация карбоновых полигонов на разнотипных ландшафтах и водоемах. Следует отметить, что всего лишь на нескольких полигонах («Карбон-Поволжье», «Тюменский карбоновый полигон», «Цимлянское водохранилище») производятся измерения удельного потока парниковых газов на акватории внутренних водоемов.

Имеющиеся глобальные оценки эмиссии метана [Johnson et al., 2021] имеют в основе данные преимущественно экспедиционных наблюдений. Как показали ежегодные исследования удельного потока (УП) метана на Можайском водохранилище [Гречушникова и др., 2019], его сезонная и межгодовая изменчивость может быть значительной, поэтому единичные измерения нельзя считать репрезентативными.

При сравнении определенных в [Johnson et al., 2021] характерных значений удельных потоков (УП) метана для водохранилищ умеренной зоны с наблюдаемыми [Репина и др., 2022] отмечены их значительные отличия. Они обусловлены большой пространственно-временной изменчивостью УП на водохранилищах вследствие их асимметричной формы, особенностей строения (различная доля мелководий), антропогенного вклада при загрязнении воды и донных отложений, уровня режима, биомассы водорослей как источника метана во время вегетации и после отмирания, а также погодных условий и притока воды. Например, для Чиркейского водохранилища различия с предложенными в [Johnson et al., 2021] среднемесячными значениями УП могут составлять два порядка [Гречушникова и др., 2022]. Поэтому большую ценность представляют собой регулярные наблюдения или периодические съемки при различных погодных условиях

в разные сезоны. Рекомендации для проведения измерений приведены в [UNESCO/IHA..., 2010]. Метод «турбулентных пульсаций», как показал опыт авторов на Можайском водохранилище, для небольших водоемов неприменим из-за сильного влияния латеральных потоков (адвекции) в приводном слое при относительной близости берега и опасности потери оборудования с мачты в штормовую погоду. К тому же измерения на одной станции для длинных водохранилищ с разным гидрологическим режимом и глубиной перемешивания плесов не репрезентативны. Поэтому на водоемах альтернативный метод измерений – это «плавающие камеры» [UNESCO/IHA..., 2010]. Метод широко используется в зарубежной и отечественной практике [Fedorov et al., 2014; Martinsen et al., 2018; Репина и др., 2022]. Рекомендованные ежемесячные измерения для точной оценки потока метана весьма трудоемки для регулярных экспедиций, а в случае труднодоступных объектов вообще невыполнимы, поэтому в руководстве [Straskraba, Tundisi, 1999] допускается минимальное количество измерительных кампаний – четыре в год. Однако из-за различных погодных условий, проточности и уровня режима межгодовая вариация в один и тот же период для водохранилища может быть значительна, как было показано на примере Ивановского водохранилища в [Гречушникова и др., 2023]: в 2020 и 2021 гг. удельный поток метана в начале августа отличался на 1–2 порядка на одних и тех же станциях.

Актуальность данной работы состоит в обобщении новейших данных, полученных в период с августа 2022 г. по март 2024 г. (пять съемок), в котором отражены сезонные изменения содержания и эмиссии метана в исследуемом водоеме и причины их пространственно-временных изменений. Столь детальные работы по сравнению с другими изученными водохранилищами [Гречушникова и др., 2023] проведены впервые. Цель работы: продемонстрировать сезонные изменения содержания метана в воде Ивановского водохранилища, а также пространственную изменчивость выхода метана из грунта и эмиссии в атмосферу по данным измерений методом «плавающих и донных камер».

Объект исследования. Ивановское водохранилище (1937) осуществляет сезонное регулирование стока р. Волги (коэффициент водообмена 10,3 раза/год [Ивановское..., 2000]). Водохранилище мелководно: акватория глубиной менее 2 м составляет около половины от всей водной поверхности водоема при наполнении до нормального подпорного уровня (124 м). Наиболее мелководный его участок – это Шошинский плес, который обособлен благодаря строительству железнодорожной дамбы и двух автомобильных мостов в его нижней части.

Вода водохранилища используется для охлаждения систем Конаковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме Мошковичского залива, куда производится сброс теплых вод, а также водоема ниже по течению. В зимний период полынья распространяется до станции Корчева (рис. 1). Водохранилище относится к долинному типу и имеет сложную морфологическую структуру, определяющую эколого-биологические различия плесов [Никаноров, 1975].

Подпор водохранилища распространяется до г. Твери, который является одним из главных источников загрязнения воды. Второй участок с неблагоприятными гидрохимическими условиями – это селитебная территория в нижнем течении р. Дойбица (нижний участок Шошинского плеса) и правобережье до с. Плоски, где активно происходит развитие туристического кластера и коттеджных поселков [Григорьева, Чекмарева, 2013; Кирпичев, Григорьева, 2018].

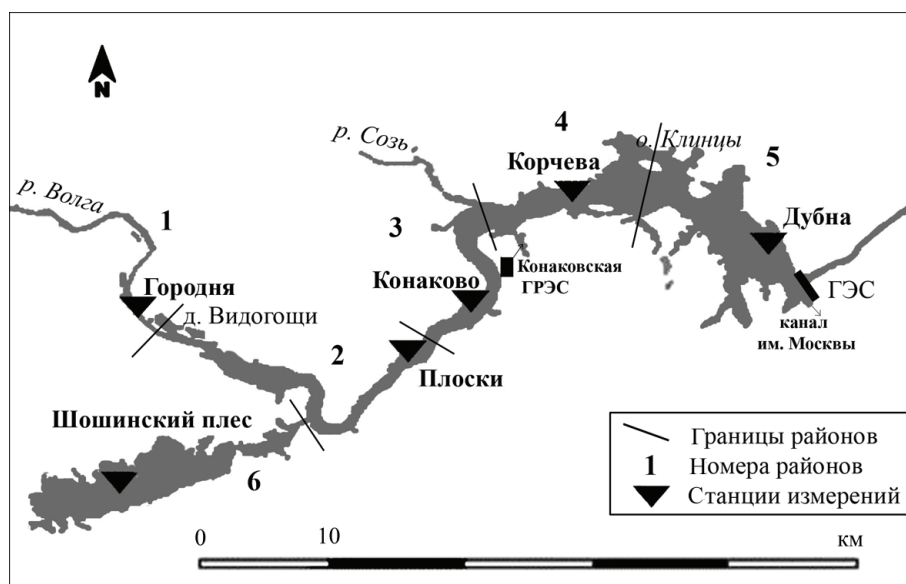


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб и измерений удельного потока на Иваньковском водохранилище

Fig. 1. Scheme of sampling stations and specific flow measurements at the Ivankovskoye Reservoir

Донные отложения (ДО) представлены первичными трансформированными и вторичными грунтами: песок – 13% площади дна (с содержанием органического вещества (ОВ) в песках 1,4–2,8%), песок илистый – 26% (3,5–9,8%), ил песчанистый – 46% (10,2–20%), ил торфянистый, отложения из макрофитов и заболоченные почвы 22,8%, размытые почвы и галька 1,3% [Законнов и др., 2018]. Суммарная площадь таких отложений, как галька, песок, илистый песок и песчанистый ил составляет 166,9 км², или 58,2%. Остальную долю занимают заболоченные почвы, серый и торфянистый ил и отложения из макрофитов.

Основным источником поступления органического углерода ($C_{орг}$) является речной сток, дающий 61% прихода [Зиминова, Законнов, 1982]. С абразией берегов и дна поступает 1,5%, суммарный вклад фитопланктона и высшей водной растительности в пересчете на $C_{орг}$ – 36%, сточные воды дают от 0,5 до 16,0%. Компоненты расходной части баланса $C_{орг}$: через гидроузел сбрасывается 64%, деструкция в воде составляет 28%, аккумуляция в донных отложениях – 4%. Большая скорость водообмена (8–13,6 раз/год), обуславливающая сброс большей

части органического вещества, и высокие скорости деструкции определяют низкий темп аккумуляции биогенных элементов в ДО.

В настоящее время наступила четвертая стадия зарастания Иваньковского водохранилища, характеризующаяся массовым распространением болотных растений и образованием в заливах сплавин. Особенно значительно зарастание выражено на Шошинском плесе, а по обрывистым берегам Волжского плеса зарастание почти не выражено [Груздева и др., 2017]. Высшая водная растительность на волжском участке представляет собой бордюрные заросли с небольшой долей плавающих и погруженных макрофитов, зарастание характерно для отдельных заливов. По оценке [Экзерцев и др., 1990], доля покрытия мелководий высшей водной растительностью увеличилась с 16,7 (1957 г.) до 26–28% (1980 г.) и продолжает удерживаться близкой к этой величине по отдельным заливам [Казмирук и др., 2004]. Процесс идет в сторону образования сплавин, которые, закрепляясь на дне и зарастая ивняком, образуют болотные ландшафты. По оценкам [Законнов и др., 2018] на 2012 г. переход сплавин в заболоченные почвы измерялся 40 км², или 14%

площади водохранилища. Данная проблема столь детально рассмотрена, поскольку имеет большое значение для расчета суммарной эмиссии, как будет показано далее.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Съемки водохранилища были проведены 04–05.08.2022, 13–14.03.2023, 15–16.05.2023, 04–05.08.2023, 17–18.03.2024 в интервале 9–21 ч. По данным из открытых источников (<https://allrivers.info/>) уровень воды в дни измерений составлял 123,35; 121,16; 123,73; 123,82; 120,59 м абс. соответственно. Съемки в марте приурочены к концу периода ледостава, когда еще безопасно находиться на льду. Выполнялись следующие виды работ. Измерение вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности проводилось зондами YSI ProOdo и Pro30. Прозрачность воды определялась по диску Секки. Отбор проб воды производился из поверхностного и придонного горизонтов на фарватере (над затопленным руслом), а 04–05.08.2023 дополнительно над затопленной водохранилищем поймой р. Волги. Отбор проб с катера производили батометром Руттнера, в марте 2023 и 2024 гг. – со льда погружным насосом. Содержание метана в отобранных пробах воды определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом headspace [Bastviken et al., 2010]. Соотношение водной и воздушной фаз 40 и 20 мл. На станциях проводилось измерение удельного потока метана в атмосферу методом «плавающих камер» [Bastviken et al., 2004]. Объем пластиковых камер с поплавками 10 л, время экспозиции 15 минут, измерения проводились в трех камерах, пробы воздуха в начале и в конце экспозиции закачивались в стеклянные флаконы объемом 20 мл с концентрированным раствором NaCl. В период съемки 04–05.08.2023 производилось измерение выхода метана из донных отложений донной камерой. Камера объемом 64 л устанавливалась на поверхность донных отложений и экспонировалась 30–40 минут. Перед погружением из камеры удалялся атмосферный воздух. Отбор проб воды из камеры производился посредством шланга длиной 15 м. Перед отбором вода из шланга удалялась откачкой шприцом (360 мл). Содержание метана в воде определялось методом headspace (см. выше). Определение потока из ДО производилось по разнице концентраций метана в начале и конце измерения. Описание аналогичной методики измерений приведено в [Малахова и др., 2020].

Пробы донных отложений отбирали на станциях в русловой ложбине дночерпателем Экмана-Бэрджа. Определение органического вещества в грунте производилось методом потерь при прокаливании.

Для первичной оценки эмиссии метана авторы предлагают следующий подход. Районировать водоем в соответствии с характерными участками по глубине и особенностями гидроэкологического режима: 1) Тверь – п. Видогощи; 2) п. Видогощи – д. Плоски; 3) д. Плоски – устье р. Созь; 4) устье р. Созь – о. Клиницы; 5) о. Клиницы – плотина ГЭС; 6) Шошинский плес. Для всех районов, кроме первого, принять соотношение разнотипных по выделению метана донных отложений 60% (песок, заиленный песок) к 40% (ил, опесчаненный ил). Более детальная оценка по районам возможна в дальнейшем при накоплении данных об эмиссии метана с различных морфологических участков. Для первого района принять характерными песчаные донные отложения. В каждом районе задать коэффициент выброса метана в соответствие со средними данными натурных измерений за съемку над руслом и над поймой. При отсутствии данных над поймой принять значения по аналогии в соответствии с глубиной (для первого и шестого районов аналог – шестой район).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведено вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода в период проведения съемок. В августе 2022 г. стратификация была более выражена, чем в 2023 г.: сильнее прогревался поверхностный слой воды 0–2 м, содержание кислорода в придонном слое снижалось до 2 мг/л и менее, а в поверхностном из-за цветения воды, наоборот, достигало 16–18 мг/л. В марте имела место обратная стратификация, в 2023 г. при более высоком уровне воды в Шошинском плесе выражено уменьшение содержания кислорода ко дну, в 2024 г. при более глубокой сработке содержание кислорода в Шошинском плесе наименьшее из-за большей доли подземного притока в водной массе плеса. Станция Городня находится в условиях сильной проточности, поэтому распределение характеристик здесь наиболее равномерное по вертикали при отсутствии накопления ила в русловой ложбине.

По полученным результатам отмечены значительные внутригодовые изменения содержания и УП метана (табл. 1, 2). Прежде всего, выявлены различия содержания метана в воде в конце зимнего периода. В марте 2024 г. содержание метана существенно больше, несмотря на большее со-

держание O_2 в придонном слое (7,2–11,9 против 2,4–10,8 мг/л). Это обусловлено различием уровня режима и притока воды в водоем в течение предшествующего периода. В 2024 г. производилась более глубокая предполоводная сработка, чем в 2023 г. (120,43 и 121,12 м абс. соответственно), притом что приток в водоем меньше, чем зимой 2023 г. (69,3 и 74,9 млн m^3 соответственно). Это означает, что весенний выброс метана при стаивании льда в разные годы для водохранилища может быть различен. Как показали измерения (см. табл. 1), содержание метана в период ледостава может превышать летние концентрации, когда придонные горизонты прогреты и метаногенез в грунтах теоретически идет более активно. По-видимому, в формировании баланса метана в данном водоеме в зимний период большую роль играет его поступление с притоками с заболоченного водосбора при ограничении выхода в атмосферу при ледоставе. В 2024 г. содержание метана в воде в Шошинском плесе было существенно больше из-за его меньшего разбавления при смешении притока с водной массой данного участка из-за ее меньшего объема при уровне на 57 см ниже, чем в 2023 г.

Измерения УП метана производили только в период открытой воды. Выявлены значительные отличия величины УП в мае и августе, что связано с изменением содержания метана в толще воды при плотностном расслоении водоема, активизацией пузырькового потока из донных отложений при снижении содержания растворенного кислорода в придонном слое воды. В 2022 и 2023 гг. УП метана в августе также различен. На глубоководных станциях Конаково, Корчева и Дубна в 2022 г. он меньше как из-за более высокого атмосферного давления, чем в 2023 г. (1021–1022 и 1007–1010 мб), так и из-за перенасыщения верхнего слоя воды кислородом при вспышке цветения. Измерения над русловой ложбиной и над поймой в августе 2023 г. выявили пространственные изменения УП, которые необходимо учитывать при расчете суммарной эмиссии со всего водоема. Донные отложения на мелководьях среднего и нижнего участков (станции Плоски, Конаково, Корчева и Дубна) представлены главным образом заиленными песками, бедными органическим веществом. В августе 2023 г. были дополнительно произведены экспериментальные измерения с постановкой камеры на дно. Полученные результаты показали, что на пойменных станциях (опесчаненный ил) поток метана из ДО меньше, чем на русловых (тонкодисперсные илы). Одна экспозиция, выделенная в таблице 2 курсивом, видимо получилась неудачной, поскольку поток метана на поверхности оказался больше выхода из дна.

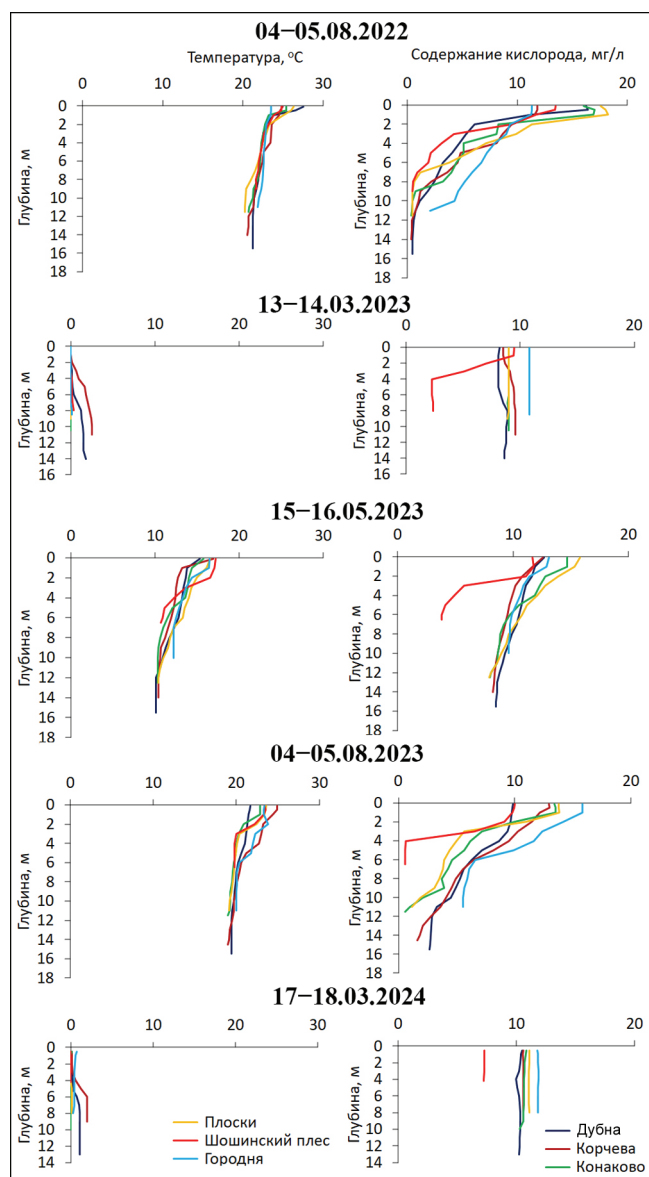


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода по данным съемок на станциях измерений

Fig. 2. Vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen according to survey data at the measurement stations

Скорее всего, это связано с неудачной постановкой камеры (при большой глубине и волнении на поверхности опустить ее на дно ровно – весьма непростая задача). Волнение является серьезным препятствием такого рода измерений, в том числе и на поверхности воды, именно по этой причине в таблице некоторые ячейки имеют пропуски данных. Наибольшее сокращение потока метана в атмосферу по сравнению с выходом из ДО на 95–97% отмечено для пойменных станций в Плосках и Конаково, наименьшее для Городни, где выход метана из ДО также самый низкий.

Таблица 1

Содержание метана в поверхностном/придонном слое воды, мкл/л

Станция	04–05.08.2022, над руслом	13–14.03.2023, над руслом	15–16.05.2023, над руслом	03–04.08.2023, над руслом	03–04.08.2023, над поймой	17–18.03.2024, над руслом
Городня	13,5/72,6	11,8/12,6	10,4/14	6/3,5 (10,5)*	–	25/24,7
Шошинский плес	12,3/435	–	1,5/10	3,2/73,9 (5)	–	954/846
Плоски	–	–	6,7/27	11,4/130 (13,2)	14,5/24,1 (3,8)	103/115
Конаково	11,2/444	–	6,3/25	11,9/80,1 (11)	17,8/27,4 (4,5)	162/133
Корчева	11,3/518	3,7/2,3	3,9/14,3	10/30,1 (14)	10,3/15,1 (5,2)	107/53,7
Дубна	2,3/89,4	1/0,8	1,5/6,2	4/25,3 (15)	3,8/6,7 (6)	3,4/7,6

Примечание. *В скобках указана глубина станции (м); прочерк – нет данных.

Таблица 2

Удельный поток CH_4 на границе ДО – вода и вода – атмосфера, $\text{мгC}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$

Станция	Удельный поток CH_4 из воды				Удельный поток CH_4 из ДО	
	04– 05.08.2022, над руслом	15–16.05.2023, над руслом	03–04.08.2023, над руслом	03–04.08.2023, над поймой	03–04.08.2023, над руслом	03–04.08.2023, над поймой
Городня	23,4	4,4	5,6	–	6	–
Шошинский плес	182	4,0	69,5	–	–	–
Плоски	–	3,9	289,4	4	596	88
Конаково	13,8	2,0	96	2,5	119	81
Корчева	23	1,9	141,6	20,1	40	21
Дубна	2,1	0,3	2,9	3,6	12	–

Примечание. Курсивом выделено сомнительное значение, поскольку поток из ДО меньше потока в атмосферу.

Расчет суммарного потока метана из водоема в соответствии с предложенной выше методикой приведен в таблице 3. По данным измерений в середине мая 2023 г. (см. табл. 2) видно, что значения УП очень мало различаются между станциями. При предположении, что эти различия малы и в поперечном направлении, можно дать оценку эмиссии без деления водоема на зоны с различными типами грунта, учитывая только продольные изменения. В этом случае эмиссия составит 0,8 тC/сут. Для съемки в августе в сутки эмиссия метана оценивается в 12,5 тC/сут. Следует отметить, что данные величины нежелательно экстраполировать на другие периоды (декады), когда гидрологическая структура водоема и содержание метана в его толще могли отличаться. Основные процессы, приводящие к изменениям удельного потока метана, – это изменения синоптических условий: изменение атмосферного давления, влияющего на интенсивность пузырькового потока; скорости ветра, влияющей на коэффициент обмена на границе сред и на глубину ветро-волнового перемешивания;

температуры воздуха и интенсивности солнечной радиации, влияющих на распределение температуры воды, растворенного кислорода и активность фитопланктона и микробиоты. Следует отметить и большое значение изменения уровня воды, которое также влияет на интенсивность пузырькового потока и масштабы окисления метана в толще воды, на развитие устойчивой стратификации. Столь значительные сезонные изменения (0,8 и 12,5 тC/сут) требуют либо более частых измерений потока метана, либо привлечения для оценки математического моделирования. Следует упомянуть и о межгодовой изменчивости, которая рассмотрена в работе [Гречушникова и др., 2023]. Так, в более жарком 2021 г. с меньшей проточностью величины потока метана оказались выше, чем в 2020 г. Особенности содержания и эмиссии метана тесно связаны с комплексом гидроэкологических характеристик. Так, жаркая погода в июле 2021 г. привела к более значительному повышению температуры в придонных горизонтах и к снижению содержания O_2 в придонном слое. Относительно не-

большой поток в районе Конаково и у плотины может быть связан с большим содержанием O_2 в придонных горизонтах, чем на ст. Корчева между ними. Но если в Конаково причина в меньшей глубине и хорошей проточности этого участка из-за сужения водоема, то в приплотинном плесе причиной может быть влияние сбросов воды через плотину.

Эти обстоятельства говорят о необходимости проведения измерений в течение нескольких лет для определения характерных среднемесячных значений УП метана. Дополнительные исследования требуются для изучения внутрисуточной динамики эмиссии метана и особенностей при зарастании разнотипными макрофитами. Среди публикаций, посвященных вопросам эмиссии метана, единичные работы посвящены таким аспектам, как внутрисуточные изменения его удельного потока. Например, в [Малахова и др., 2022] исследуется устьевая область р. Черной (Крым). Суточная динамика изменения концентрации растворенного в воде CH_4 , как и гидрологических параметров, имела колебательный характер. Наиболее тесная связь получена между значениями концентрации CH_4 и температурой воды, а также с содержанием растворенного кислорода. Больше публикаций посвящено внутрисуточным изменениям удельного потока метана с болот, например в [Шнырев, 2016; Kettunen, 2002]. Внутрисуточная изменчивость потоков метана из болота увеличивается с внутрисуточной изменчивостью температуры воздуха и уменьшается с увеличением глубины залегания болотных вод. В работе [Sieczko et al., 2002] выявлено, что наибольший поток в исследованных озерах Ljusvattnetjärn, Erssjön, Parsen и Venasjön приходится на период 10:00 и 16:00, а наименьший – с 00:00 до 04:00, причем как в периоды стратификации, так и в периоды перемешивания. В статье [Podgrajsek et al., 2014] опубликованы противоположные результаты: на озере Tämnapen поток изменялся от 0 до 25 $mgCH_4/(m^2 \cdot сут)$ днем и ночью соответственно. Следует отметить, что в этой работе поток измерялся методом ковариации пульсаций, а в предыдущей – камерным методом. В работе [Chanton et al., 1993] внутрисуточные изменения потока метана с заболоченных территорий связывают с влиянием растительного покрова. Влиянию непосредственно макрофитов на поток метана с водоемов посвящено больше работ, чем внутрисуточным изменениям. В работе [Marinho et al., 2015] увеличение потока метана связано с увеличением площади зарослей погруженных макрофитов. Отмечено, что увеличению потока метана способствует более интенсивное накопление ОВ в ДО на заросшей литорали. Иные условия эмиссии метана имеют место для зарослей надводных макрофитов, где 80–90% потока выводится через аэренхиму растений [Whiting,

Chanton, 1996]. В обзоре, приведенном в этой статье, указано, что с рисовых плантаций поток метана в различное время суток может различаться в 1,5–2 раза, что связано с изменением температуры дна водоема, что обусловлено скорее активизацией метаногенеза. Для растений видов *Typha* и *Cladium* выявлен утренний максимум эмиссии метана, который связывают с активизацией растений при увеличении освещенности. Противоречивые сведения делают актуальным исследование влияния различных видов макрофитов в рассматриваемом водоеме, поскольку покрытая макрофитами площадь может достигать 27% [Иваньковское..., 2000].

Площадь зарастания макрофитами Иваньковского водохранилища в работе [Экзерцев и др., 1990] оценивалась в 83 km^2 . По данным В.В. Законнова [Законнов и др., 2018], 40 km^2 этих зарослей трансформировались в заболоченные почвы. По данным [Гидрометеорологический..., 1973], площадь водохранилища при НПУ составляла 342 km^2 . В [Справочник..., 1988] площадь водохранилища составляла 327 km^2 . По данным [Приказ..., 2019] площадь водохранилища при НПУ уже составляет 316 km^2 . Уменьшение площади, указанной в официальных источниках, действительно свидетельствует об ее сокращении при зарастании. Современные оценки площади всего водохранилища, занятой макрофитами, отсутствуют. Поэтому в расчете эмиссии метана с поверхности водохранилища эта составляющая не учтена (табл. 3). На перспективу необходимо запланировать уточнение оценки масштабов зарастания и уточнение современной площади водоема, а также произвести измерения потока метана с макрофитов различного типа (погруженных, плавающих и надводных).

Сравнение полученных значений УП метана с данными [Johnson et al., 2021], которые использованы для глобальной оценки выбросов метана водохранилищами, показали, что измеренные авторами потоки значительно ниже тех, что приведены в упомянутой публикации: для мая 2023 г. 0,3–4,7 против 135 $mgC/(m^2 \cdot сут)$, а для августа 4–289 (средневзвешенное по площади 39,6) против 240 $mgC/(m^2 \cdot сут)$. При оценках, полученных авторами [Johnson et al., 2021] не использовались данные с водоемов на территории РФ за исключением Саяно-Шушенского водохранилища. Поэтому глобальные оценки выбросов метана водохранилищами умеренной зоны нельзя считать окончательными. Вопрос с параметризацией значений УП для водохранилищ умеренной зоны, в т. ч. для Иваньковского водохранилища, остается открытым и требует как продолжения ряда наблюдений при различных гидрологических и синоптических условиях, так и применения математического моделирования для численных экспериментов.

Таблица 3

Расчет суточной эмиссии метана с поверхности Иваньковского водохранилища на период проведения съемок в 2023 г.

Характеристики	Номера отсеков водохранилища					
	1	2	3	4	5	6
Площадь при НПУ*, км ²	16,9	26,4	30,6	67,8	70,1	104,3
15–16 мая 2023 г.						
УП метана над русловыми станциями, мгС/(м ² ·сут)	4,4	3,9	2	1,9	0,3	4
Итого для района, тС/сут	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
3–4 августа 2023 г.						
Песчаные отложения 60% (100% для р-на 1), км ²	16,9	15,8	18,3	40,7	42,1	62,6
Ил, затопленные почвы, отложения из макрофитов (40%), км ²	0,0	10,6	12,2	27,1	28,0	41,7
УП метана для песчаных отложений, мгС/(м ² ·сут)	5,6	4	2,5	20,1	3	4
УП метана для илистых отложений, мгС/(м ² ·сут)	–	290	96	142	4	70
Итого для района, тС/сут	0,1	3,1	1,2	4,7	0,2	3,2

Примечание. *Суммарная площадь водохранилища принята по данным [Приказ..., 2019].

По сравнению с другими водохранилищами Волжско-Камского каскада [Гречушникова и др., 2023] интервал изменения УП метана с Иваньковского водохранилища (0,2–289 мгС/(м²·сут)) близок к Рыбинскому (2,4–315 мгС/(м²·сут)). Для Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ наибольшие значения УП метана на порядок меньше.

ВЫВОДЫ

По результатам полевых компаний получены данные о внутригодовом изменении содержания метана в водной толще и его эмиссии с поверхности Иваньковского водохранилища.

Впервые выполнены измерения потока метана на границе вода – донные отложения методом камер. Получены характерные масштабы удельного потока из грунта.

Показаны значительные изменения потока метана в различные периоды открытой воды, расчет

суммарной эмиссии с поверхности воды подтверждает ее изменение на порядок от мая к августу в зависимости от гидрологической структуры водной толщи и прогрева донных отложений.

Оценена пространственная неоднородность потока метана в период его наибольших значений в августе, впервые проведены измерения не только по продольной оси, но и на поперечниках. Показано, что основной фактор в пределах морфологически однородных районов – это не глубина, а состав донных отложений.

Основные задачи изучения эмиссии метана с Иваньковского водохранилища на перспективу: уточнение площади его поверхности с учетом зарастания заливов, определение удельного потока метана с разнотипных макрофитов, определение эмиссии метана с заросшей акватории, оценка внутрисуточных изменений удельного потока метана.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24–27–00034, обработка проб на хроматографе произведена при поддержке ЛПГ ИФА РАН (госзадание 1022030400001–9 «Мониторинг и анализ динамики эмиссии парниковых газов из наземных и пресноводных экосистем Арктической зоны России»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги / под ред. З.А. Викилиной, В.А. Знаменского. Л.: Наука, 1973. 158 с.
- Григорьева И.Л., Чекмарева Е.А. Влияние рекреационного водопользования на качество воды Иваньковского водохранилища // Известия РАН. Сер. Географическая. 2013. № 3. С. 63–70. DOI: 10.15356/0373-2444-2013-3-63-70.
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М. и др. Эмиссия метана с поверхности долинного Можайского водохранилища // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(77-85).
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Ломова Д.В., Ломов В.А. Результаты натурных измерений потока метана с разнотипных водохранилищ // Изв. Иркутского государ-

- ственного университета. Сер.: Науки о земле. 2022. Т. 40. С. 3–13. DOI: 10.26516/2073-3402.2022.40.3.
- Гречушников М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А. и др. Пространственно-временные различия гидроэкологических характеристик и эмиссии метана Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 81–89. DOI: 10.31857/S0321059623010078.
- Гречушников М.Г., Репина И.А., Фролова Н.Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913.
- Груздева Л.П., Суслов С.В., Груздев В.С. и др. Проблемы зарастания водохранилищ в бассейне волжской и московской водохозяйственных систем // Вестн. Межд. АН. Русская секция. 2017. № 1. С. 97–100.
- Законнов В.В., Григорьев А.И., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги // Водное хозяйство России. 2018. № 3. С. 35–48.
- Зиминова Н.А., Законнов В.В. Балансы биогенных элементов в Иваньковском водохранилище // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л.: Наука, 1982. С. 239–258.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004. 310 с.
- Кирпичев И.А., Григорьева И.Л. Исследование влияния коттеджной застройки береговой зоны Иваньковского водохранилища на качество воды водоема // Вестн. Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2018. № 1(38). С. 19–25.
- Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н. и др. Измерения флюидной разгрузки метана ловушечным методом в бухте Ласпи (Черное море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2020. № 6. С. 162–167.
- Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н. и др. Сезонные и суточные закономерности содержания и потоков метана в эстуарии реки Черной (Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 6. С. 27–39.
- Никаноров Ю.И. Иваньковское водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.
- Приказ Росводресурсов № 125 от 31.05.2019 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге», 2019.
- Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л. и др. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718. DOI: 10.31857/S0321059622060141.
- Справочник водохранилищ СССР: в 2 ч. Часть 1. Водохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
- Шнырев Н.А. Режимные наблюдения и оценка газообмена на границе почвы и атмосферы (на примере потоков метана стационара среднетаежной зоны Западной Сибири «Мухрино»): автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2016. 25 с.
- Экзерцев В.А., Лищина Л.И., Довбня И.В. Сукцессии гидрофильной растительности в литорали Иваньковского водохранилища // Тр. ИБВВ РАН. 1990. Вып. 59(62). С. 120–132.
- Bastviken D., Cole J., Pace M. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol. 18, p. 1–12, DOI: 10.1029/2004GB002238.
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling, *Environmental Science & Technology/Environmental Science and Technology*, 2010, vol. 44, no. 14, p. 5450–5455, DOI: 10.1021/es1005048.
- Chanton J.P., Whiting G.J., Happell J.D. et al. Contrasting rates and diurnal patterns of methane emissions from emergent aquatic macrophytes, *Aquatic Botany*, 1993, vol. 46, p. 111–128.
- Deemer B., Harrison A., Li S. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, p. 949–964.
- Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I. et al. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP, *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, p. 33–36, DOI: 10.1007/s10749-015-0569-3.
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, vol. 126(8), p. 1–19, DOI: 10.1029/2021JG006305.
- Kettunen A. Modelling of microscale variations in methane fluxes. D.Sc. Thesis in Technics, Helsinki, 2002. 40 p.
- Marinho C.C., Cleber P.-S., Edélti F.A. et al. Emergent Macrophytes Alter the Sediment Composition in a Small, Shallow Subtropical Lake: Implications for Methane Emission, *American Journal of Plant Sciences*, 2015, vol. 6, p. 315–322, DOI: 10.4236/ajps.2015.62036.
- Martinsen K.T., Kragh T., Sand-Jensen K. Technical note: A simple and cost-efficient automated floating chamber for continuous measurements of carbon dioxide gas flux on lakes, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, p. 5565–5573, DOI: 10.5194/bg-15-5565-2018.
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. Diurnal cycle of lake methane flux, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, p. 236–248, DOI: 10.1002/2013JG002327.
- Rosentreter J., Borges A., Deemer B. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources, *Nature Geoscience*, 2021, no. 14, p. 1–6, DOI: 10.1038/s41561-021-00715-2.
- Sieczko A.K., Duc N.T., Schenk J. et al. Diel variability of methane emissions from lakes, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, vol. 117, p. 21488–21494, DOI: 10.1073/pnas.2006024117.
- Straskraba M., Tundisi J.G. Guidelines of lake management, vol. 9, Reservoir Water Quality Management, Japan, Int. Lake environment Committee (ILEC), 1999, 229 p.
- Whiting G.J., Chanton J.P. Control of the Diurnal Pattern of Methane Emission from Emergent Aquatic Macrophytes by Gas Transport Mechanisms, *Aquatic Botany*, 1996, vol. 54, p. 237–253, DOI: 10.1016/0304-3770(96)01048-0.

Электронный источник

UNESCO/IHA Greenhouse-Gas Measurement Guidelines for Fresh Water Reservoirs. UNESCO/IHA Research Project, 2010, URL: <http://www.hydropower.org/iha/development/ghg/guidelines.html> (data access 31.10.2024).

Поступила в редакцию 22.08.2024

После доработки 15.12.2024

Принята к публикации 12.03.2025

EVALUATION OF METHANE EMISSIONS FROM THE IVANKOVSKOYE RESERVOIR

M.G. Grechushnikova¹, V.S. Kazantsev²

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

² Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Laboratory of Greenhouse Gases

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: allavis@mail.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: kazantsev@ifaran.ru

The article summarizes materials from a multi-method research of the Ivankovo Reservoir carried out in 2022–2024 to study seasonal changes of methane concentration in water and its emission from the surface. The survey included both methane flux measurement at the water – atmosphere boundary, with due consideration of its spatial variability, and measurement of methane emissions from the bottom sediments. The measurements were carried out by a chamber method (floating and bottom). The samples were processed using the Chromatek-Crystall 5000.2 chromatograph. Sampling locations were chosen taking in account the morphological structure of the reservoir, the type of bottom sediments, and the depth intervals.

The measurements have shown that the values of methane flux on longitudinal and transverse sections could differ by two orders of magnitude. Its lowest values are within the areas with sandy bottom. The highest value of methane flux is in the area with significant anthropogenic load, i. e. from the inflow of the Shoshinsky reach to the Ploski village. According to the classification based on the water exchange coefficient, the Ivankovo Reservoir belongs to the group of flow-through reservoirs with seasonal flow regulation; however under certain weather conditions the oxygen deficiency areas appear in the reservoir. During these periods, the methane flux from such areas becomes comparable with that from the low-flow water bodies. Therefore, the summer decrease in flowage and more frequent heat waves are unfavorable factors increasing the methane emission. Low-water periods when the water level decreases relative to the FSL during the navigation period are also unfavorable because of the increase in methane flux.

The obtained values of methane flux were compared with published data, and significant differences were found for the spring period. A methodology for estimating methane emission from a reservoir is proposed, taking into account the factors that determine its flux. Seasonal changes in emission are described, and the increased frequency of measurements and the need to measure methane flux over different types of macrophytes are argued.

Keywords: bottom sediments, dissolved oxygen, water temperature, water exchange, synoptic conditions

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-27-00034); the chromatographic sample processing was carried out with the support of the LGG IAP RAS (state task 1022030400001-9 “Monitoring and analysis of the dynamics of greenhouse gases emission from terrestrial and freshwater ecosystems of the Arctic zone of Russia”).

REFERENCES

- Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biochemical Cycles*, 2004, vol. 18, p. 1–12, DOI: 10.1029/2004GB002238.
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling, *Environmental Science and Technology*, 2010, vol. 44, no. 14, p. 5450–5455, DOI: 10.1021/es1005048.
- Chanton J.P., Whiting G.J., Happell J.D., Gerard G. Contrasting rates and diurnal patterns of methane emissions from emergent aquatic macrophytes. *Aquatic Botany*, 1993, vol. 46, p. 111–128.
- Deemer B., Harrison A., Li S. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *Springer. BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, p. 949–964.
- Ekzertsev V.A., Lisitsyna L.I., Dovbnya I.V. Suktsessii gidrofil’noi rastitel’nosti v litorali Ivan’kovskogo vodokhranilishcha [Successions of hydrophilic vegetation in the littoral zone of the Ivankovo Reservoir], *Tr. IBVV RAN*, 1990, vol. 59(62), p. 120–132. (In Russian)
- Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I. et al. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP, *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, p. 33–36, DOI: 10.1007/s10749-015-0569-3.
- Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Hydrometeorological Regime of Lakes and Reservoirs in the USSR. Upper Volga Reservoirs], Z.A. Vikulinoi, V.A. Znamenskogo (eds.), Leningrad, Nauka Publ., 1973, 158 p. (In Russian)
- GOST 31957–2012. *Voda. Metody opredeleniya shchelocnosti i massovoi kontsentratsii karbonatov i gidrokarbonatov* [State Standart 31957–2012. Water. Methods for determination of alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates], Moscow, Standartinform Publ., 2013, 25 p. (In Russian)

- Grechushnikova M.G., Lomova D.V., Lomov V.A. et al. Prostranstvenno-vremennye razlichiya gidroekologicheskikh kharakteristik i emissii metana Ivan'kovskogo vodokhranilishcha [Space and time variations of hydroenvironmental characteristics of the Ivankovo Reservoir in years with different weather conditions], *Vodnye resursy*, 2023, vol. 50, no. 1, p. 81–89, DOI: 10.31857/S0321059623010078. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Frolova N.L. et al. Soderzhanie i potoki metana v Volzhskikh vodokhranilishchah. [Methane Concentration and Fluxes in Volga River Reservoirs], *Izvestiya RAN, Ser. Geogr.*, 2023, no. 87(6), p. 899–913, DOI: 10.31857/S2587556623060080. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Lomova D.V., Lomov V.A. Rezul'taty naturnykh izmerenii potoka metana s raznotipnykh vodokhranilishch [The results of field measurements of methane flux from various reservoirs], *Izv. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. Nauki o zemle*, 2022, vol. 40, p. 3–13, DOI: 10.26516/2073-3402.2022.40.3. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M. et al. Methane emission from the surface of the Mozhaish valley-type Reservoir, *Geography and Natural Resources*, 2019, vol. 40, p. 247–255, DOI:10.1134/S1875372819030077.
- Grigor'eva I.L., Chekmareva E.A. Vliyanie rekreatsionnogo vodopol'zovaniya na kachestvo vody Ivan'kovskogo vodokhranilishcha [The influence of the recreation on water quality of the Ivankovo Reservoir], *Izvestiya RAN, Ser. Geogr.*, 2013, no. 3, p. 63–70, DOI: 10.15356/0373-2444-2013-3-63-70. (In Russian)
- Gruzdeva L.P., Suslov S.V., Gruzdev V.S., Khrustaleva M.A. Problemy zarastaniya vodokhranilishch v basseine volzhskoi i moskvoretskoi vodokhoziaistvennykh sistem [Problems of overgrowing reservoirs in the catchment basin of the Volga and Moskvoretskaya hydrotechnical systems], *Vestn. Mezhd. AN., Russkaya sektsiya*, 2017, no. 1, p. 97–100. (In Russian)
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy okhrany [Ivankovo Reservoir: Current state and problems of protection], Moscow, Nauka Publ., 2000, 344 p. (In Russian)
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs, *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, 2021, vol. 126(8), p. 1–19, DOI: 10.1029/2021JG006305.
- Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. Zarastayushchie vodotoki i vodoemy: Dinamicheskie protsessy formirovaniya donnykh otlozhenii [Overgrowing streams and water bodies: Dynamic processes of formation of bottom sediments], Moscow, Nauka Publ., 2004, 310 p. (In Russian)
- Kettunen A. *Modelling of microscale variations in methane fluxes*, diss. for the deg. of Dr. of Tech. Helsinki, 2002, 40 p.
- Kirpichev I.A., Grigor'eva I.L. Issledovanie vliyaniya kotedzhnoi zastroiki beregovoi zony Ivan'kovskogo vodokhranilishcha na kachestvo vody vodoema [Study of the influence of cottage development of the coastal zone of the Ivankovo Reservoir on the water quality of the water body], *Vestn. Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna"*, 2018, no. 1(38), p. 19–25. (In Russian)
- Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N., Murashova A.I. Methane fluid discharge measurements by the trap method in Laspi Bay (Black Sea), *Moscow University Physics Bulletin*, 2020, vol. 75, no. 6, p. 705–711, DOI: 10.3103/S0027134920060132.
- Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N., Murashova A.I. Sezonnie i sutochnie zakonomernosti soderzhaniya i potokov metana v estuarii reki Chernoi (Krim) [Seasonal and daily patterns of methane content and emission in the estuary of Chernaya river (Crimea)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 6, p. 27–39. (In Russian)
- Marinho C.C., Cleber P.-S., Edélti F.A. et al. Emergent Macrophytes Alter the Sediment Composition in a Small, Shallow Subtropical Lake: Implications for Methane Emission, *American Journal of Plant Sciences*, 2015, no. 6, p. 315–322, DOI: 10.4236/ajps.2015.62036.
- Martinsen K.T., Kragh T., Sand-Jensen K. Technical note: A simple and cost-efficient automated floating chamber for continuous measurements of carbon dioxide gas flux on lakes, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, p. 5565–5573, DOI: 10.5194/bg-15-5565-2018.
- Nikanorov Yu.I. Ivan'kovskoe vodokhranilishche [Ivankovo Reservoir], *Izv. GosNIORKh*, 1975, vol. 102, p. 5–25. (In Russian)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. Diurnal cycle of lake methane flux, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, 119, 236–248, DOI:10.1002/2013JG002327.
- Prikaz Rosvodresurov ot 31.05.2019 No. 125 "Ob utverzhdenii Pravil ispol'zovaniya vodnykh resurov Ivan'kovskogo vodokhranilishcha na r. Volge" [Rosvodresurs order dated 31.05.2019 No 125 "On approval of the Rules for the use of water resources of the Ivankovo reservoir on the Volga River"], 2019. (In Russian)
- Repina I.A., Terskii P.N., Gorin S.L. et al. Field measurements of methane emission at largest reservoirs in Russia in 2021. The start of large-scale studies, *Water Resources*, 2022, vol. 49, p. 1003–1008, DOI: 10.1134/S0097807822060148.
- Rosentreter J., Borges A., Deemer B. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources, *Nature Geoscience*, 2021, no. 14, p. 1–6, DOI: 10.1038/s41561-021-00715-2.
- Shnirev N.A. *Rezhimnyye nablyudeniya i otsenka gazoobmena na granitse pochvy i atmosfery (na primere potokov metana statsionara sredne-tayezhnoy zony Zapadnoy Sibiri "Mukhrino")* [Regular observations and assessment of gas exchange at the boundary of soil and atmosphere (using the example of methane flows at the Mukhrino station in the middle taiga zone of Western Siberia)], Extended Abstracts of Ph.D. Thesis in Biology, Moscow, 2016, 25 p. (In Russian)
- Sieczko A.K., Duc N.T., Schenk J. et al. Diel variability of methane emissions from lakes, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, vol. 117, p. 21488–21494, DOI: 10.1073/pnas.2006024117.
- Spravochnik vodokhranilishch SSSR: v 2 ch., chast' 1, *Vodokhranilishcha ob'emom 10 mln m³ i bolee* [Directory of the USSR reservoirs, in 2 parts, part 1. Reservoirs with a volume of 10 million m³ or more], Moscow, Soyuzvodproekt Publ., 1988, 323 p. (In Russian)
- Straskraba M., Tundisi J.G. *Guidelines of lake management, vol. 9. Reservoir Water Quality Management*, Japan, Int. Lake environment Committee (ILEC), 1999, 229 p.

- Vinberg G.G. *Pervichnaya produktsiya vodoemov* [Primary production of water bodies], Minsk, the Academy of Sciences of the Belarusian SSR Publ., 1960, 329 p. (In Russian)
- Whiting G.J., Chanton J.P. Control of the Diurnal Pattern of Methane Emission from Emergent Aquatic Macrophytes by Gas Transport Mechanisms, *Aquatic Botany*, 1996, 54, p. 237–253, DOI: 10.1016/0304-3770(96)01048-0.
- Zakonnov V.V., Grigor'eva I.L., Zakonnova A.V. Prostranstvenno-vremennaya transformatsiya gruntovogo kompleksa vodokhranilishch Volgi [Spatiotemporal transformation of the Volga reservoir ground complex], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2018, no. 3, p. 35–48. (In Russian)
- Ziminova N.A., Zakonnov V.V. [Balances of biogenic elements in the Ivankovo Reservoir], *Ekologicheskie issledovaniya vodoemov Volgo-Baltiiskoi i Severo-Dvinskoi vodnykh system* [Ecological studies of water bodies of the Volga-Baltic and North-Dvina water systems], Leningrad, Nauka Publ., 1982, p. 239–258. (In Russian)
- Web sources*
- UNESCO/IHA Greenhouse-Gas Measurement Guidelines for Fresh Water Reservoirs, UNESCO/IHA Research Project, 2010, URL: <http://www.hydropower.org/iha/development/ghg/guidelines.html> (date of access 31.10.2024).

Received 22.08.2024

Revised 15.12.2024

Accepted 12.03.2025