

ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА ВОДОХРАНИЛИЩАМИ РОССИИ*

М.Г. Гречушникова^{1,2}, Д.И. Школьный¹

E-mail: allavis@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

² ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ: На основе базы данных характеристик эмиссии метана водохранилищами, дополненной авторами материалами собственных измерений, произведена оценка эмиссии метана с поверхности водохранилищ Российской Федерации. Данные натурных наблюдений классифицированы с учетом основных факторов, определяющих интенсивность метаногенеза и его эмиссию с поверхности водоемов. В качестве основного фактора предложено использовать величину коэффициента водообмена, характеризующего проточность водоемов и определяющего возможность возникновения в них бескислородных условий. Дальнейшее деление учитывает географическое положение водоема, трофический статус водоема и среднюю глубину. При расчете среднего удельного потока метана для выделенных по климатическому признаку групп исключены данные эмиссии с водохранилищ в пределах городских территорий. С учетом предложенных значений осредненного по климатическим зонам потока метана его эмиссия с поверхности водохранилищ Российской Федерации оценивается в 0,53 Тг CH_4 /год. Наибольшая эмиссия метана характерна для субъектов РФ, к которым относятся наиболее крупные водохранилища, т. е. Поволжье. Для областей с наибольшим числом водохранилищ (Челябинская, Курская, Пензенская, Воронежская, Тамбовская и др.) суммарная эмиссия сравнительно невелика из-за относительно небольшой суммарной площади их зеркала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метан, растворенный кислород, первичная продукция, водообмен, водохранилище, коэффициент водообмена.

Водоохранилища являются важной составляющей хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения в большинстве регионов России. Однако, кроме очевидной пользы от регулирования речного стока, водохранилища стали источником ряда проблем, в число которых входит изменение климата прилегающих территорий. Научным сообществом также

* Работа выполнена при поддержке проекта РНФ (проект № 14-17-00155), полевые измерения проведены в рамках проекта РФФИ-РГО (№17-05-41095)

© Гречушникова М.Г., Школьный Д.И., 2019

обсуждаются методики оценки дополнительной эмиссии парниковых газов с поверхности искусственных водных объектов, особенно – метана, ввиду того, что эти процессы вносят свой вклад в глобальные климатические изменения [1, 2]. Несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с поверхности водохранилищ, этот вопрос остается открытым, поскольку представленные оценки основаны на ограниченном числе данных и имеют довольно большой разброс: 69 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [3], 95–122 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [4], 2–4 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [5], 4,8 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [6], 17,9 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [7]. Данные оценки выполнены на основании результатов натурных наблюдений в различных регионах мира (преимущественно в Канаде, США и Бразилии). Значительные различия в оценке могут быть связаны как с переучетом суммарной площади водохранилищ (если расчет выполнен в т. ч. для зарегулированных озер), так и с отсутствием дифференциации водоемов по глубине и проточности. База данных [7] показала, что интенсивность эмиссии метана существенно различается в зависимости от возраста водохранилища, его проточности, сезона наблюдений и многих других факторов. Величина удельного потока метана с поверхности водохранилища в атмосферу зависит от его потока из донных отложений, непосредственного образования в воде, поступления с поверхности водосбора (в т. ч. с притоками и в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод), а также от окисления метана в водной толще и соотношения диффузионной и пузырьковой составляющей эмиссии [5, 8, 9].

Цель работы – дать оценку потока CH_4 из водохранилищ России. Данная задача продиктована тем, что в настоящее время планируется внесение изменений в действующее законодательство Российской Федерации, регулирующие выбросы парниковых газов и компенсацию углеродного следа хозяйствующих субъектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов Российской Федерации проведен анализ базы данных по интегральному потоку метана и его составляющим (диффузионному и пузырьковому потоку) для расчета глобальной эмиссии с поверхности водохранилищ мира [7]. База данных включает сведения о водохранилищах различного назначения (гидроэнергетика, ирригация, водоснабжение и др.). Для определения площади поверхности водохранилищ авторами статьи [7] использована база данных по водохранилищам мира GranD [10] с исключением объектов, бывших ранее озерами. Следует заметить, что данные GranD являются неполными в отношении водохранилищ на территории бывшего СССР: в базе данных суммарная площадь учтенных водохранилищ составляет 46 551 км², в то время как по данным справочника [11] суммарная площадь

водохранилищ СССР объемом более 0,1 млн м³, за исключением зарегулированных озер, составляет 116 776 км². При этом не учитываются озера с зарегулированным водным режимом (Байкал, Онежское, Ильмень, Имандра, Ондозеро, Ковдозеро и др.). В представленной работе оценка эмиссии метана водохранилищами Российской Федерации произведена на основании данных о площади их поверхности из справочника [11] и характерных значений удельного потока метана по данным [7], дополненным авторами статьи материалами собственных наблюдений на разнотипных водохранилищах – Можайском и Горьковском, расположенных на Европейской территории России.

Измерения потока метана производили плавучими камерами с площадью основания 0,16 м² и рабочим объемом 0,058 м³ по методу, изложенному в [12]. Время экспозиции составляло от 40 до 60 мин. Концентрации метана в воздушных образцах определялись в двух-трехкратной повторности на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» (ЗАО «Хроматэк», г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором. При расчете суммарной эмиссии учтено строительство Бурейского и Богучанского водохранилищ и изменение административно-территориального деления.

Водоохранилища России расположены в пределах умеренного и умеренно-холодного климата. Для водохранилищ с коэффициентом водообмена более 2 оценка эмиссии производилась как по среднему значению потока, так и по зависимости его значения от средней глубины водоема. Для водохранилищ с коэффициентом водообмена менее 2 зависимость значений удельного потока метана от глубины не обнаружена. При оценках суммарной эмиссии не учитывалась дегазация при сбросах в нижний бьеф гидроузлов, поскольку для этого необходимы данные о содержании метана в воде у водозаборов и в реке ниже гидроузла. Сезонные изменения эмиссии метана также не учитывали, поскольку снижение газообмена в период ледостава может быть компенсировано весенним выбросом при полном перемешивании водной толщи. Данный вопрос в мировой практике мало изучен и требует дополнительных наблюдений. Поэтому для расчета эмиссии метана использовано среднегодовое значение удельного его потока в соответствии с классификацией водохранилищ по проточности, географическому положению и средней глубине. Полученные значения картированы в соответствии с административно-территориальным делением Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчетах глобальной эмиссии метана с водных объектов, как правило, производится оценка факторов, определяющих ее величину. Одними из важнейших предикторов, согласно [12–14], считаются возраст водохранилища и широта, на которой расположен водоем, как характеристика кли-

матических условий. В молодых водоемах отмечаются большие значения эмиссии из-за разложения органики затопленных ландшафтов (почв, растительности). В водохранилищах низких широт большие значения эмиссии метана наблюдаются под влиянием температурного фактора. В [7] отмечена важная роль первичной продукции, которая состоит в увеличении потока детрита на дно, являющегося источником метана, т. е. авторы указывают на прямую зависимость между трофическим статусом водоема и эмиссией метана. Однако в данном случае не учитывается тот факт, что активные продукционные процессы приводят к пересыщению поверхностного слоя кислородом, что может сокращать поток метана в атмосферу.

Измерения, проведенные авторами на слабопроточном Можайском водохранилище (коэффициент водообмена 1,15 [15]), показали, что возникающие после перемешивания водной толщи при циклонической погоде и дополнительном поступлении биогенных элементов из придонного бескислородного слоя вспышки «цветения» увеличивают содержание кислорода в поверхностных слоях до 15–16 мг/л. Пересыщение поверхностного слоя кислородом (эвазия кислорода в штилевые дни при антициклонической погоде может быть менее активной, чем при наличии ветро-волнового перемешивания) снижает удельный поток метана. После подобных вспышек с наступлением ветреной прохладной погоды при снижении содержания растворенного кислорода в поверхностном слое до 10–12 мг/л поток метана вновь увеличивается при сохранении бескислородных условий в придонных горизонтах. Разложение на поверхности донных отложений свежего детрита после вспышек «цветения» также может способствовать увеличению потока метана (рис. 1).

Синоптические условия, определяющие температурный режим водной толщи, имеют большое значение для процессов метаногенеза и его выделения в атмосферу. По результатам измерений на Можайском водохранилище в 2017 г. ветреная прохладная погода первой половины лета способствовала формированию придонной водной массы с относительно высокими значениями температуры воды – до 16 °С в конце лета в придонных слоях Красновидавского плеса. Рано установившаяся прямая стратификация летом 2018 г. способствовала изоляции придонного слоя и сохранению низких значений температуры воды (не более 12 °С в конце лета). Поэтому за период открытой воды среднее значение удельного потока метана по данным наблюдений (13–14 установок камеры в сезон) в 2017 г. оценивается в 90 мгСН₄-С/(м²сут), а в 2018 г. – 60 мгСН₄-С/(м²сут). Проведенные учащенные наблюдения показали большую пространственно-временную изменчивость потока метана в зависимости от синоптических условий и средней глубины района долинного водохранилища, характеризующегося асимметричным продольным профилем.

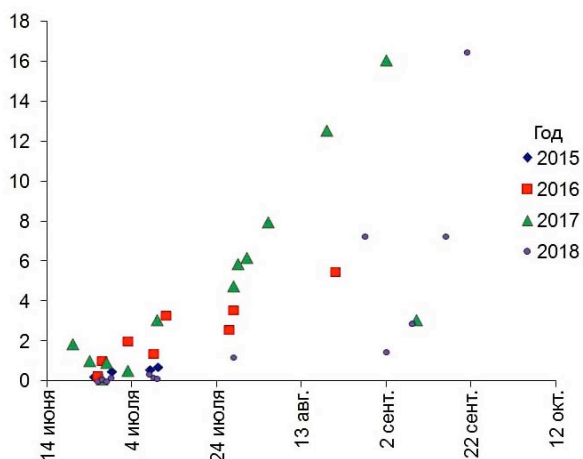


Рис. 1. Удельный поток метана $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2 \text{ ч})$ на рейдовой вертикали глубины 14 м Красновидовского плеса Можайского водохранилища (координаты 55.58 с.ш., 35.86 в.д.).

Fig.1. Methane specific flow $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2 \text{ hour})$ at the 14 m deep raid vertical of the Mozhaisk Reservoir Krasnovidovskiy Stretch.

Исследования эмиссии метана на озерной части проточного Горьковского водохранилища (коэффициент водообмена 5,4 [16]) показали, что из-за отсутствия длительных бескислородных условий и хорошей аэрации водной толщи при большой проточности удельный поток метана относительно невелик: $0,21\text{--}1,6 \text{ mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2 \text{ ч})$ (координаты станций измерений 56.77 с.ш., 43.27 в.д.; 56.98 с.ш., 43.18 в.д. и 57.33 с.ш., 43.12 в.д.). Крупные водоемы хорошо аэрируются при ветро-волновом перемешивании из-за большой длины разгона ветра, а в эвтрофных водохранилищах пересыщение верхнего слоя кислородом дополнительно препятствует значительному потоку метана в атмосферу из-за окисления.

На Саяно-Шушенском и Майнском водохранилищах также проводились натурные измерения [17]. Саяно-Шушенское водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока р. Енисей, имеет благоприятный кислородный режим и олиготрофный статус [18]. Майнское водохранилище является контррегулятором Саяно-Шушенской ГЭС и сильно проточно. Согласно данным, приведенным в [17], удельный поток метана для этих объектов невелик $0,22\text{--}1,74$ и $0,37\text{--}0,5 \text{ mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2 \text{ сут})$ соответственно, что закономерно обусловлено климатическими и ландшафтными особенностями водосбора, а также гидрологическим режимом водохранилищ.

При поиске наиболее значимых предикторов авторами статьи [7] выявлена тесная связь эмиссии метана с содержанием хлорофилла, температу-

рой воздуха, при этом зависимость от широты и средней глубины водоема оказалась незначимой. Для уточнения полученных закономерностей данные по водохранилищам [7] были разделены на две группы в зависимости от проточности водоема. Этот фактор ранее не рассматривался, между тем, коэффициент водообмена зачастую определяет характер вертикального распределения температуры воды в водохранилищах. Водоемам замедленного водообмена чаще присуще наличие стратификации, за исключением периодов конвективного перемешивания. В водохранилищах сезонного регулирования стратификация устанавливается лишь периодически, бескислородные условия в придонном горизонте наблюдаются редко.

Внутри каждой группы дальнейшее деление производилось в зависимости от климатических условий, в которых находился водоем. Как отмечено выше, для группы малопроточных водоемов внутри подгрупп с различным типом климатических условий отсутствует зависимость потока метана от средней глубины водохранилищ. В то время как для проточных водоемов такие зависимости прослеживаются для всех подгрупп (табл. 1). Анализ базы данных [7] выявил, что наибольшее значение удельного потока метана в группе малопроточных водохранилищ характерно для водохранилища Lago de Guadalupe ($700 \text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$), находящегося в черте г. Мехико. Среди проточных водохранилищ большие значения удельного потока метана характерны для водохранилищ Sorumbá ($228,6 \text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$) с территорией водосбора, освоенной в отношении сельского хозяйства, и Rampulha ($591,3 \text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$) в черте г. Белу-Оризонти. Максимальные значения удельного потока метана 1623 и $1720 \text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$ измерены на небольших мелководных (со средней глубиной менее 2 м) водохранилищах Nielisz и Rzeszów (Польша), испытывающих влияние урбанизированной и сельскохозяйственной территорий. Данные объекты исключены из обобщения и расчета средних значений удельного потока метана для соответствующего типа климата, поскольку по указанным выше причинам не могут являться репрезентативными. Следует отметить, что имеющихся данных по натурным измерениям потока метана с поверхности водохранилищ очень мало: 49 объектов в группе слабопроточных водохранилищ и 45 объектов в группе проточных водохранилищ. В этой ситуации измерение удельного потока метана с поверхности разнотипных водоемов остается актуальной задачей для научного сообщества.

На основании данных о площади водохранилищ [11] и табл. 1 произведена оценка возможных значений эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов на территории России. В табл. 2 и на рис. 2 представлены результаты расчета при использовании для оценки средних значений удельного потока метана для водохранилищ в соответствии с их географическим

Таблица 1. Осредненные значения удельного потока метана для водохранилищ в различных климатических условиях с различным коэффициентом водообмена, $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{сут})$
 Table 1. Methane specific flow average values for reservoirs in different climatic conditions with the different water exchange $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{day})$

Климатические условия	Количество водоемов	Диапазон значений удельного потока, $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{сут})$	Средний удельный поток, $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{сут})$; СКО*	Примечание	Зависимость удельного потока метана от средней глубины
Коэффициент водообмена ($K_{\text{в}}$) < 2					
Тропический климат	6	22–370	200; 99,6	Эвтрофные вахр	нет
Тропический и субтропический климат	5	1,4–10	4,40; 3,4	Олиготрофные: глубина более 15 м глубина менее 15 м	нет
Умеренный климат	3	22–36	30; 7,2	нет	нет
Умеренный климат	12	0,1–3,3	1,30; 1,2	Олиготрофные, преимущественно глубоководные водоемы, средняя глубина 44 м	нет
Умеренно-холодный климат средних широт	11	4,5–17	13; 12,1	Мезотрофно-эвтрофные вахр (без учета мелководного вахр Lokka 91,3 $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{сут})$)	нет
Умеренно-холодный климат средних широт	11	0,4–8	5; 3,1	Без учета мелководного вахр. Laforge-1 (20,5 $\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{m}^2\text{сут})$)	нет
Коэффициент водообмена ($K_{\text{в}}$) > 2					
Тропический климат	7	26–55	41; 11,7	без примечаний	$f(H) = 56,13e^{-0,016x}$, $R^2 = 0,70$
Субтропический климат	5	2–15	8; 5,8	Мезотрофно-эвтрофные вахр	$f(H) = 113,1x^{-0,921}$, $R^2 = 0,62$
Умеренный климат	16	0,1–8,5	2,70; 0,17	Олиго- и мезотрофные вахр	$f(H) = 5,24x^{-0,747}$, $R^2 = 0,76$
Умеренно-холодный климат средних широт	7	10–180	50,00; 60,8	Мезотрофные и эвтрофные вахр, средняя глубина менее 25 м	$f(H) = 376,92x^{-1,07}$, $R^2 = 0,62$
Умеренно-холодный климат средних широт	6	0,02–18	8; 6,6	без примечаний	$f(H) = 25,4e^{-0,13x}$, $R^2 = 0,67$

Примечание: *СКО – среднеквадратичное отклонение.

положением и интенсивностью водообмена. Наибольшая эмиссия метана для некоторых субъектов Российской Федерации (Республика Татарстан, Самарская, Саратовская, Нижегородская области и др.) связана с наличием на территории крупных водохранилищ. Астраханская, Челябинская, Курская, Пензенская, Воронежская и Тамбовская области отличаются наибольшим количеством водохранилищ (более 80 в каждом регионе), но это преимущественно небольшие по площади водохранилища, поэтому суммарная эмиссия для этих областей сравнительно невелика. Наименьшие значения эмиссии метана для субъектов РФ обусловлены малым числом небольших водохранилищ или суровыми климатическими условиями.

По данным проведенной оценки суммарная годовая эмиссия с водохранилищ Российской Федерации составляет 0,4–0,54 Тг CH_4 -С/год (0,53–0,72 Тг CH_4 /год), т. е. более 16–19 % от суммарной эмиссии с искусственных водоемов мира по оценке авторов с использованием БД GranD, справочника [11] и табл. 1 (3,4–3,8 Тг CH_4 /год), или 3–4 % от суммарной эмиссии по оценке, опубликованной в [7]. При этом суммарная площадь водохранилищ РФ составляет 17,7 % от площади водохранилищ, учтенной в [7] (без зарегулированных озер). Несмотря на многочисленные оценки глобальной эмиссии метана и попытки параметризации удельного потока метана для неохваченных наблюдениями водоемов, данный вопрос требует дальнейшего изучения. Приведенную оценку следует рассматривать как ориентировочную. Необходимо пополнять банк данных по разнотипным водохранилищам в различных природных зонах с учетом степени антропогенного воздействия и загрязнения водоемов. Так, для водоемов, испытывающих антропогенное воздействие, выражающееся в поступлении значительного количества биогенных веществ со стоками бытовых и сельскохозяйственных сточных вод, характерно эвтрофирование, рост первичной продукции, увеличение потока детрита и рост содержания кислорода в поверхностном слое. Необходимы натурные измерения с поверхности водоемов для оценки удельной плотности потока метана и изучения его изменений в зависимости от характера продукционных процессов в водоемах, кислородного режима, зарослей макрофитов и синоптических условий.

К числу малоизученных вопросов относится выброс и окисление метана за период перемешивания при разрушении стратификации водной толщи. В димиктических водоемах полное перемешивание происходит два раза в год, в мономиктических – один раз. В полимиктических водоемах перемешивание возможно несколько раз в год. В долинных водохранилищах с асимметричным профилем разрушение стратификации и перемешивание до дна происходит поэтапно. Развитие конвекции год от года складывается по-разному в зависимости от синоптических условий и размера водоема:

разрушение стратификации и выравнивание характеристик по глубине может произойти за несколько дней или длиться не меньше декады, когда перемешивание постепенно проникает в более глубокие слои, и выброс метана может происходить послойно, при этом – с большой долей окисления.

Весенний выброс метана можно оценить по разности запаса метана в водной толще до стаивания льда и после очищения водоема с учетом пузырьков, вмержших в лед [19]. Особое внимание следует уделить исследованию относительно неглубоких мезотрофных и эвтрофных проточных водохранилищ в умеренном климате, поскольку для данной категории разброс измеренных величин удельного потока метана наибольший (табл. 1.)

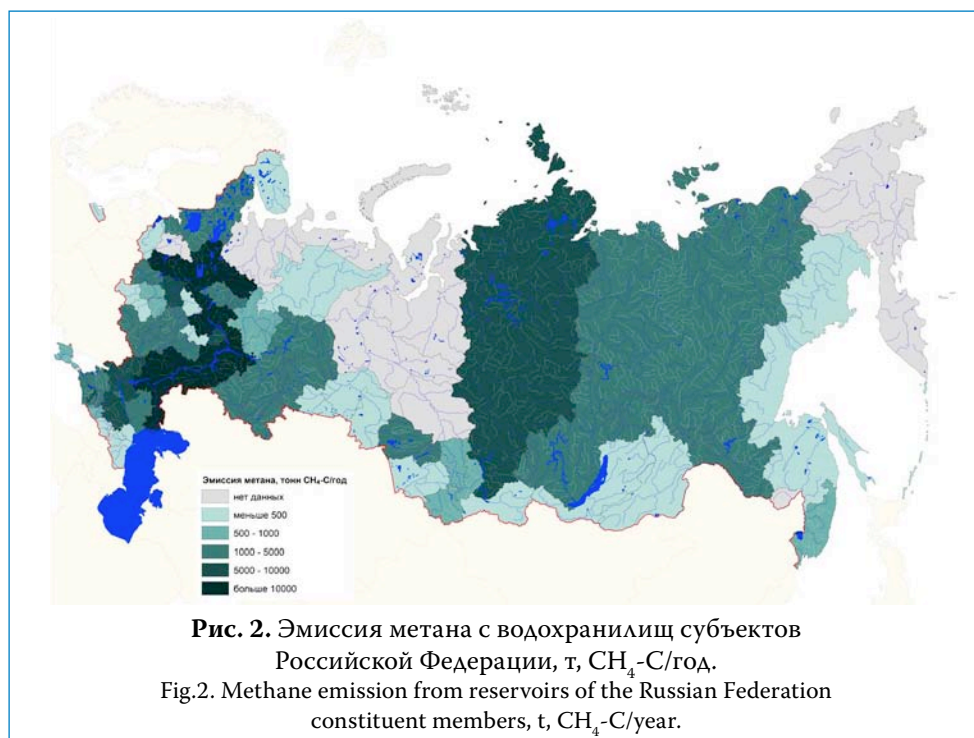
Таблица 2. Оценка суммарной эмиссии метана с водохранилищ субъектов Российской Федерации по средним значениям удельного потока метана
Table 2. Estimation of the total methane emission from reservoirs of the Russian Federation constituent members, average values of the methane specific flow

Субъект РФ	Выделение CH_4 -С/год, т	Субъект РФ	Выделение CH_4 -С/год, т
Омская обл.	6,6	Смоленская обл.	1746,4
Псковская обл.	14,6	Воронежская обл.	1785,2
Сахалинская обл.	14,6	Пензенская обл.	1798,6
Республика Кабардино-Балкария	32,9	Курская обл.	1853,8
Республика Чечня	37,9	Свердловская обл.	2324,9
Республика Северная Осетия – Алания	42,0	Оренбургская обл.	2834,7
Забайкальский край	55,7	Республика Калмыкия	2859,3
Республика Бурятия	68,4	Краснодарский край	3674,0
Калининградская обл.	92,0	Челябинская обл.	3705,9
Алтайский край	98,0	Пермский край	4117,8
Республика Коми	144,6	Республика Башкортостан	4188,9
Орловская обл.	148,3	Ленингр. обл. и г. Санкт-Петербург	4498,8
Хабаровский край	163,7	Иркутская обл.	4876,3
Республика Дагестан	165,5	Московская обл. и г. Москва	6487,9
Магаданская обл.	187,5	Ставропольский край	7162,2
Владимирская обл.	234,5	Республика Чувашия	7574,1
Курганская обл.	250,3	Республика Адыгея	7732,0
Тюменская обл.	269,4	Ростовская обл.	9784,4
Республика Тыва	328,0	Красноярский край	9869,1
Брянская обл.	337,9	Ульяновская обл.	10 246,6
Республика Мордовия	355,9	Тверская обл.	11 588,9
Мурманская обл.	433,6	Астраханская обл.	12 022,8
Приморский край	520,7	Вологодская обл.	12 708,7
Республика Крым и г. Севастополь	535,5	Ивановская обл.	12 885,3
Республика Алтай	610,3	Волгоградская обл.	13 558,8
Кемеровская обл.	645,6	Ярославская обл.	19524,9

Продолжение таблицы 2.

Table 2.

Субъект РФ	Выделение CH_4 -C/год, т	Субъект РФ	Выделение CH_4 -C/год, т
Калужская обл.	682,6	Республика Марий Эл	21 988,5
Республика Хакассия	690,2	Нижегородская обл.	23 668,8
Тульская обл.	724,7	Саратовская обл.	29 249,1
Республика Удмуртия	766,2	Самарская обл.	37 449,8
Кировская обл.	910,7	Республика Татарстан	79 251,4
Республика Карачаево-Черкесия	965,4	Томская обл.	нет данных
Белгородская обл.	1033,3	Камчатский край	нет данных
Республика Саха	1093,3	Еврейская АО	нет данных
Республика Карелия	1129,4	Ненецкий АО	нет данных
Тамбовская обл.	1250,1	Ханты-Мансийский АО – Югра	нет данных
Рязанская обл.	1314,0	Чукотский АО	нет данных
Новосибирская обл.	1337,4	Ямало-Ненецкий АО	нет данных
Амурская обл.	1350,7	Архангельская обл.	нет данных
Липецкая обл.	1542,1	Новгородская обл.	нет данных
Костромская обл.	1742,1	Республика Ингушетия	нет данных
Итого 395 344,4			



ВЫВОДЫ

Согласно предварительной оценке, основанной на базе данных натуральных наблюдений на водохранилищах мира, расположенных в различных природно-климатических условиях, эмиссия с поверхности искусственных водоемов России составляет 0,53–0,72 Тг CH_4 /год. Однако данных натуральных измерений на водохранилищах России очень мало. Детальные наблюдения на Можайском водохранилище в 2015–2018 гг. выявили значительную пространственно-временную изменчивость удельного потока метана с поверхности малопроточного водохранилища. Для более точной оценки и параметризации этого процесса необходимо дополнять базу данных наблюдениями на разнотипных водохранилищах, имеющих различный гидроэкологический режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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. Vol. 10. No. 1. P. 172–185.
3. 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. Vol. 50. P. 766–775.
4. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525.
5. 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. Vol. 13. P. 1381–1386.
6. Varis O., Kummu M., Härkönen S., Huttunen J.T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs. In: Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (eds) *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012. P. 69–94.
7. Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro 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. Vol. 66. No. 11. P. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>.
8. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону. М.: Ростиздат. 2005. 329 с.
9. 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. Vol. 50. P. 766–775.
10. Global Reservoir and Dam (GRanD). Режим доступа: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/pfs/grand.html> (дата обращения 20.06.2018).

11. Справочник водохранилищ СССР. Ч. I. Водоохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
12. [UNESCO–IHA] International Hydropower Association, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. 2010. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. IHA. (23 August 2016; www.hydropower.org/ghg-measurement-guidelines). 2012. GHG Risk Assessment Tool (Beta Version) User Manual. IHA. (23 August 2016. Режим доступа: www.ceeg.uqam.ca/Prairie/Publications_files/USER%20MANUAL-Risk%20Assessment%20Tool%20-%20BetaVersion.pdf) (дата обращения 18.06.2018).
13. Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., del Giorgio P.A., Roland F., Huszar VLM. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nature Geoscience*. 2011. No. 4. P. 593–596.
14. Hertwich E.G. Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA. // *Environmental Science and Technology*. No. 47. P. 9604–9611.
15. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмоскovie (наблюдения, диагноз, прогноз) / В. В. Пуклаков, Ю. С. Даценко, А. В. Гончаров и др. Москва, 2015. 284 с.
16. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Верхней Волги. Л., 1975. 292 с.
17. Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Chusov A.N., Atrashenok V.P., Molodtsov D.V., Savvichev A.S., Zinchenko A.V. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP // *Power Technology and Engineering*. 2015. Vol. 49. No. 1. P. 33–36. DOI: 10.1007/s10749-015-0569-3/.
18. Ермолаева Н.И. Водные экосистемы. Особенности формирования зоопланктона водохранилищ: аналит. обзор Сибирское отделение РАН; Ин-т вод. и экол. проблем СО РАН. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2008. 69 с.
19. Казанцев В.С., Кривенко Л.А., Гречушникова М.Г. Весенний выброс метана из Можайского водохранилища // Тезисы докладов. 22-я Международная школа-конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». 23–29 сентября 2018. Майкоп: Изд-во ИП Кучеренко В.О., 2018. С. 32.

Для цитирования: Гречушникова М.Г., Школьный Д.И., Оценка эмиссии метана водохранилищами России // *Водное хозяйство России*. 2019. № 2. С. 58-71.

Сведения об авторах:

Гречушникова Мария Георгиевна, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы; научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: allavis@mail.ru

Школьный Данила Игоревич, научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы; e-mail: thabigd@gmail.com

ESTIMATION OF METHANE EMISSION FROM RESERVOIRS OF RUSSIA

Maria G. Grechushnikova^{1,2}, Danila I. Shkolniy¹

E-mail: allavis@mail.ru

¹ MSU Faculty of Geography, Moscow, Russia² Water Problems Institute, RAS, Moscow, Russia

Abstract: The assessment of methane emission from the surface of reservoirs in the Russian Federation has been undertaken on the basis of methane emission characteristics from reservoirs' database, supplemented with measurements made by the authors. We classified the field observations data taking into account the main factors determining the intensity of methanogenesis and its emission from the surface of water bodies. We propose the value of the water exchange coefficient characterizing the flow of water bodies, which determines the possibility of occurrence of oxygen-free conditions in them as the main factor. Further division takes into account the geographical position of the reservoir, trophic status of the reservoir and the average depth. When calculating the average specific flow of methane for the groups allocated on the climatic basis we excluded the emission data from reservoirs within urban areas. Taking into account the proposed values of the averaged methane flux, its emission from the surface of the Russian reservoirs is estimated at 0.53 Tg CH₄/year.

Keywords: methane, dissolved oxygen, primary production, water exchange, reservoir.

About the authors:

Maria G. Grechushnikova, Leading Researcher, Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Hydrological Department; 19991 Moscow Vorobiev Gory, GSP-1; Researcher, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia; allavis@mail.ru

Danila I. Shkolniy, Researcher, Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Hydrological Department; 19991 Moscow Vorobiev Gory, GSP-1; thabigd@gmail.com

For citation: Grechushnikova M.G., Shkolniy D.I. Estimation of Methane Emission from Reservoirs of Russia // *Water Sector of Russia*. 2019. No. 2. P. 58-71.

REFERENCES

1. 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.
2. 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, No. 1. P. 172-185.
3. 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.
4. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. V. 444. P. 524–525.
5. 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.
6. Varis O., Kummu M., Härkönen S., Huttunen J.T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs. In: Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (eds) *Impacts of Large Dams*:

- A Global Assessment. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012. P. 69–94.
7. 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, No. 11. P. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>.
 8. Fedorov J.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Horoshevskaya V.O. Metan v vodnykh yekosistemakh [Methane in aquatic ecosystems]. – Rostov-na-Donu – M., Rostizdat, 2005, 329 s.
 9. 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.
 10. Global Reservoir and Dam (GRanD), Vol. 1. (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/pfs/grand.html>).
 11. Spravochnik vodokhranilishch SSSR. [Reference book of reservoirs of the USSR] CH. I. Vodokhranilishcha ob'yomom 10 mln m³ i boleye. M.: Soyuzvodproekt, 1988. 323 p.
 12. [UNESCO–IHA] International Hydropower Association, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. 2010. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. IHA. (23 August 2016; www.hydropower.org/ghg-measurement-guidelines). 2012. GHG Risk Assessment Tool (Beta Version) User Manual. IHA. (23 August 2016; www.ceeg.uqam.ca/Prairie/Publications_files/USER%20MANUAL-Risk%20Assessment%20Tool%20-%20BetaVersion.pdf).
 13. Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., del Giorgio P.A., Roland F., Huszar V.L.M. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nature Geoscience*. 2011. No. 4. P. 593–596.
 14. Hertwich E.G. Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA. // *Environmental Science and Technology*. 2-13. No 47. P. 9604–9611.
 15. Gidroyekologicheskiy rezhim vodokhranilishch Podmoskovya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz) [Hydrological regime of the Moscow region reservoirs]// V.V. Puklakov, J. S. Dacenko, A. V. Goncharov et al. *Pero Moskva*, 2015. S. 284.
 16. Gidrometeorologicheskiy rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Vodokhranilishha Verhney Volgi. [Hydro/meteorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Reservoirs of the Upper Volga] L., 1975. 292 s.
 17. Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Chusov A.N., Atrashenok V.P., Molodtsov D.V., Savvichev A.S., Zinchenko A.V. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP // *Power Technology and Engineering*. 2015. V. 49, No. 1. P. 33–36. doi: 10.1007/s10749-015-0569-3/.
 18. Ermolaeva N.I. Vodnye ehkosistemy. Osobennosti formirovaniya zooplanktona vodokhranilishch: analiz. obzor / Gos. publich. nauch.-tekhn. b-ka Sib. otd-niya Ros. akad. nauk; In-t vod. iekhol. problem Sib. otd-niya Ros. akad. nauk. . Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2008. 69 s.
 19. Kazancev V.S., Krivenok L.A., Grechushnikova M.G. Vesenniy vybros metana iz Mozhayskogo vodokhranilishcha [Spring methane emission from the Mozhaiysk Reservoir]// 22-ya Mezhdunarodnaya shkola-konferentsiya molodyh uchyonykh «Sostav atmosfery. Atmosfernoe elektrichestvo. Klimaticheskie processy». 23-29 sentyabrya 2018 goda, Maykop, Rossiya. Tezisy dokladov. – Izd-vo IP Kucherenko V.O. Majkop, 2018. – pp. 32.