

УДК 556.555+547.211

МЕТОД ОЦЕНКИ НАИБОЛЬШЕГО УДЕЛЬНОГО ПОТОКА МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

© 2024 г. М. Г. Гречушников^{a,b,*}, И. А. Репина^b, В. С. Казанцев^b, В. А. Ломов^{a,b}

^aМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^bИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: allavis@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

В работе приведены результаты обобщения измерений авторами и их коллегами удельного потока метана на разнотипных водохранилищах России, которые проводились методом «плавающих камер» в разные периоды годового гидроэкологического цикла. Наблюдениями охвачены следующие водоемы: Ивановское, Рыбинское, Горьковское, Куйбышевское, Волгоградское, Можайское, Озернинское, Цимлянское, Богучанское, Саяно-Шушенское, Бурейское, Зейское, Чиркейское водохранилища. Выбранные водоемы различаются условиями формирования стока на водосборах, проточностью, трофическим статусом, характером изменчивости температуры воды и содержания растворенного кислорода, распределением органического вещества в донных отложениях. Измерения проводились по единой методике с определением содержания метана в пробах на хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2, что обеспечило однородность рядов данных. Предложен подход для параметризации удельного потока метана для расчета максимально возможной эмиссии метана с искусственных водоемов при разработке количественных квот выбросов парниковых газов. Предложена оценка удельного потока метана как в разные фазы гидрологического режима (стратификация, гомотермия), так и для отдельных морфологических частей водохранилищ, различающихся глубиной. Произведено сравнение результатов, полученных предложенной методикой с расчетами годовой эмиссии метана методом IPCC.

Ключевые слова: водохранилище, метан, эмиссия, глубина, водообмен

DOI: 10.31857/S0002351524040074 EDN: JHAXFW

ВВЕДЕНИЕ

Изменение баланса парниковых газов в речном бассейне после создания водохранилища является в настоящее время темой как научных, так и политических дискуссий [UNESCO/ИНА..., 2013]. И так как водохранилища все чаще признаются в качестве важных источников глобальной эмиссии парниковых газов [Deemer et al., 2016, Tranvik et al., 2009, Tremblay et al., 2005], и прежде всего метана, это учитывается в мировой экологической политике и является частью национальных кадастров парниковых газов для Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Lovelock et al., 2019].

Водоохранилища, созданные плотинами, отличаются от естественных водных систем рядом ключевых параметров, которые могут увеличить выбросы парниковых газов. Во-первых, затопление больших запасов наземного органического

го вещества может способствовать микробному разложению, превращая органическое вещество, хранящееся в надземной и подземной биомассе, в углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и окись азота (N_2O). Во-вторых, водохранилища испытывают большие колебания уровня воды, чем естественные озера: падение гидростатического давления во время снижения уровня воды может привести к усилению пузырьковой эмиссии метана. Органическое вещество (ОВ), являющееся источником парниковых газов, также поступает в водохранилище с поверхности водосбора, в том числе с притоками и в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Причиной повышенных эмиссий парниковых газов в атмосферу может служить и дегазация в нижнем бьефе при сбросе воды через плотину. Также содержание метана является показателем экологического благополучия водоемов, а повышенная его концентрация — признаком загрязнения [Федоров и др., 2005].

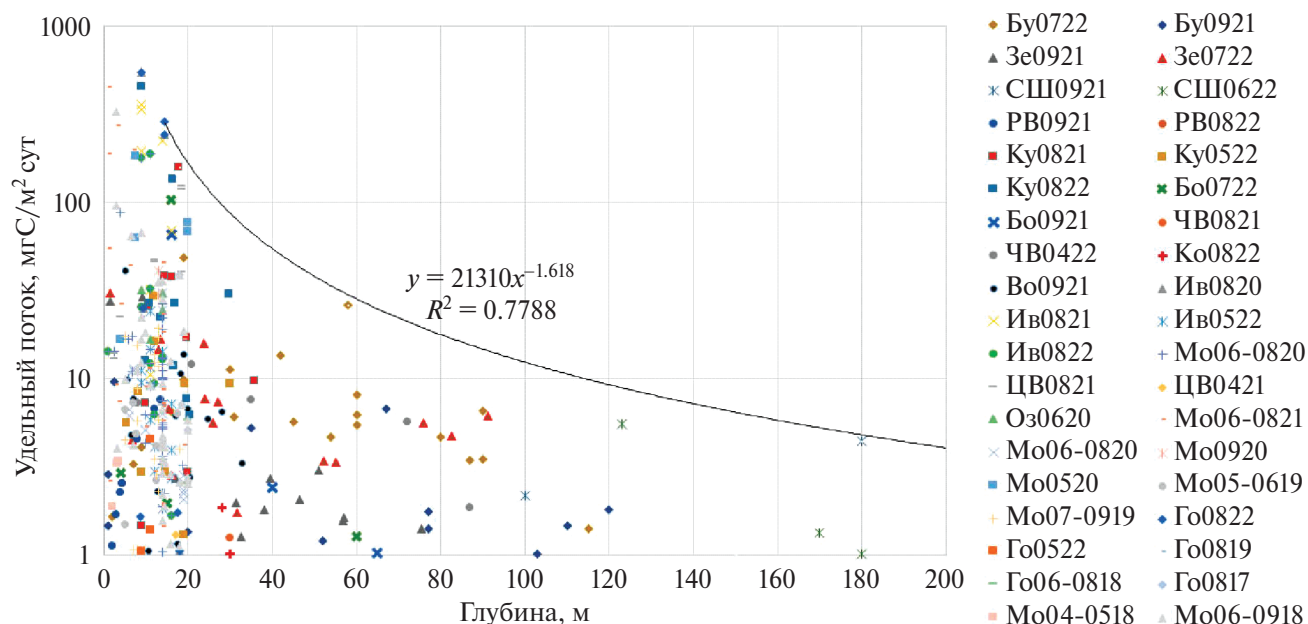


Рис. 1. Зависимость удельного потока метана с районов разнотипных водохранилищ разной глубины.

Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира достаточно много, но при этом они сильно различаются между собой — от 2 до 122 Тг/год. Такое существенное различие связано с тем, что используемые для оценок измерения проводились в разное время, разными методами, не учитывалась межсезонная и межгодовая изменчивость, отсутствовала единая методика оценки суммарной площади водоемов. Кроме того, в разных работах отличаются и методы группировки водохранилищ. Для разработки количественных значений квот выбросов парниковых газов необходимо изучить пространственно-временные масштабы их эмиссии из водохранилищ. По сравнению с исследованиями в Бразилии, Канаде, США, Китае и Европейских странах в России наблюдениями до недавнего времени было охвачено мало водоемов [Johnson et al, 2021, Елистратов и др., 2014]. Согласно исследованиям, выполненным ранее [Deemer et al, 2016; Гречушникова, Школьный, 2019, Tortajada et al. 2012, Rosentreter et al., 2021], основными факторами, влияющими на эмиссию метана, являются трофический статус водоема, его глубина, термический и кислородный режим, условия водообмена. Именно многофакторность процесса затрудняет параметризацию удельного потока и его диагностические и прогностические расчеты, поскольку помимо диффузного потока метан может выделяться в виде пузырьков. Этот процесс носит весьма нестационарный харак-

тер, зависит от колебаний атмосферного давления, роющей активности бентоса и неравномерен в пространстве [Harrison et al, 2016]. Большой разброс оценок характерных значений удельного потока метана с водохранилищ в пределах одной климатической зоны (полярной, умеренной субтропической и тропической) делает глобальные оценки эмиссии метана с водоемов [Varis et al, 2012] сомнительными, поскольку этот подход не учитывает такие особенности водоемов, как морфологическое строение и проточность. Ввиду уникальности каждого искусственного водного объекта даже при наличии их типизации и общих черт гидроэкологического режима невозможно произвести измерения в абсолютном большинстве водоемов для получения надежной оценки удельного потока. Дополнительным инструментом может быть математическое моделирование [Stepanenko et al, 2016, Степаненко и др., 2020], но для настройки модели конкретного водоема необходимы данные о его режиме и входные параметры для валидации.

В качестве подхода для экспресс-параметризации потока метана авторами предложено использовать его максимальные значения, основываясь на данных полевых измерений в разные фазы гидрологического режима разнотипных водоемов, подразделяя их по признаку глубокководности. Именно глубина водоема оказывает значительное влияние на его термический, кислородный

Таблица 1. Сведения об измерительных кампаниях

Водохранилище	Период измерений	Кол-во станций	Аббревиатура
Зейское	Сентябрь 2021	14	Зе0921
	Июль 2022	17	Зе0722
Бурейское	Сентябрь 2021	21	Бу0921
	Июль 2022	23	Бу0722
Саяно-Шушенское	Сентябрь 2021	7	СШ0921
	Июнь 2022	7	СШ0622
Рыбинское	Сентябрь 2021	8	РВ0921
	Август 2022	12	РВ0822
Богучанское	Сентябрь 2021	14	Бо0921
	Июнь 2022	11	Бо0622
Чиркейское	Август 2021	6	ЧВ0821
	Апрель 2022	5	ЧВ0422
Колымское	Август 2022	17	Ко0822
Волгоградское	Сентябрь 2021	18	Во0922
Куйбышевское	Август 2021	9	Ку0821
	Май 2022	9	Ку0522
	Август 2022	10	Ку0822
Горьковское	Август 2017	4	Го0817
	Июнь-август 2018	3	Го06–0818
	Май 2022	4	Го0522
	Август 2022	13	Го0822
Иваньковское	Август 2020	5	Ив0820
	Август 2021	5	Ив0921
	Май 2022	6	Ив0522
	Август 2022	6	Ив0822
Цимлянское	Апрель 2021	1	ЦВ0421
	Август 2021	6	ЦВ0821
Озернинское	Июнь 2020	5	Оз0620
Можайское	Апрель-май 2018	3	Мо04–0518
	Июнь-сентябрь 2018	39	Мо06–0918
	Июль 2019	10	Мо0719
	Август 2019	7	Мо0819
	Май 2020	5	Мо0520
	Июнь-Август 2020	10	Мо06–0820
	Июнь-Август 2021	33	Мо06–0821
	Июнь-Август 2022	51	Мо06–0822

и, в итоге, гидроэкологический режим. Глубоководные водохранилища, расположенные в горных районах, обычно имеют олиготрофный или мезотрофный статус, что также определяет общие черты режима потока метана с их поверхности. Равнинные водохранилища обычно мелководны с максимальной глубиной порядка 30–35 м, что обуславливает лучшее прогревание придонных слоев [Готлиб, 1976]. Обычно их водосборы в силу большей освоенности территорий подвержены активной антропогенной трансформации (промышленность, сельское хозяйство, урбанизация), что способствует притоку в водохранилища взвешенных и растворенных веществ и, в итоге, определяет их мезотрофный или евтрофный статус [Эдельштейн, 1998] и формирование донных отложений с большей долей органической составляющей по сравнению с олиготрофными водое-

мами горных территорий [Садчиков, Кудряшов, 2004]. Кроме значительной пространственной изменчивости потока метана с поверхности водохранилищ, существует и его выраженный сезонный [Aben et al, 2017], а иногда и суточный ход [Sieczko et al, 2020]. Использование оценки максимальных значений удельного потока метана позволит избежать неоднозначности в тех случаях, где оценка его средней величины невозможна из-за короткого ряда измерений, либо измерения отсутствуют.

Цель настоящей работы – определить максимально возможный удельный поток метана с учетом глубины разнотипных водохранилищ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа использован массив данных измерений удельного потока метана, полученных

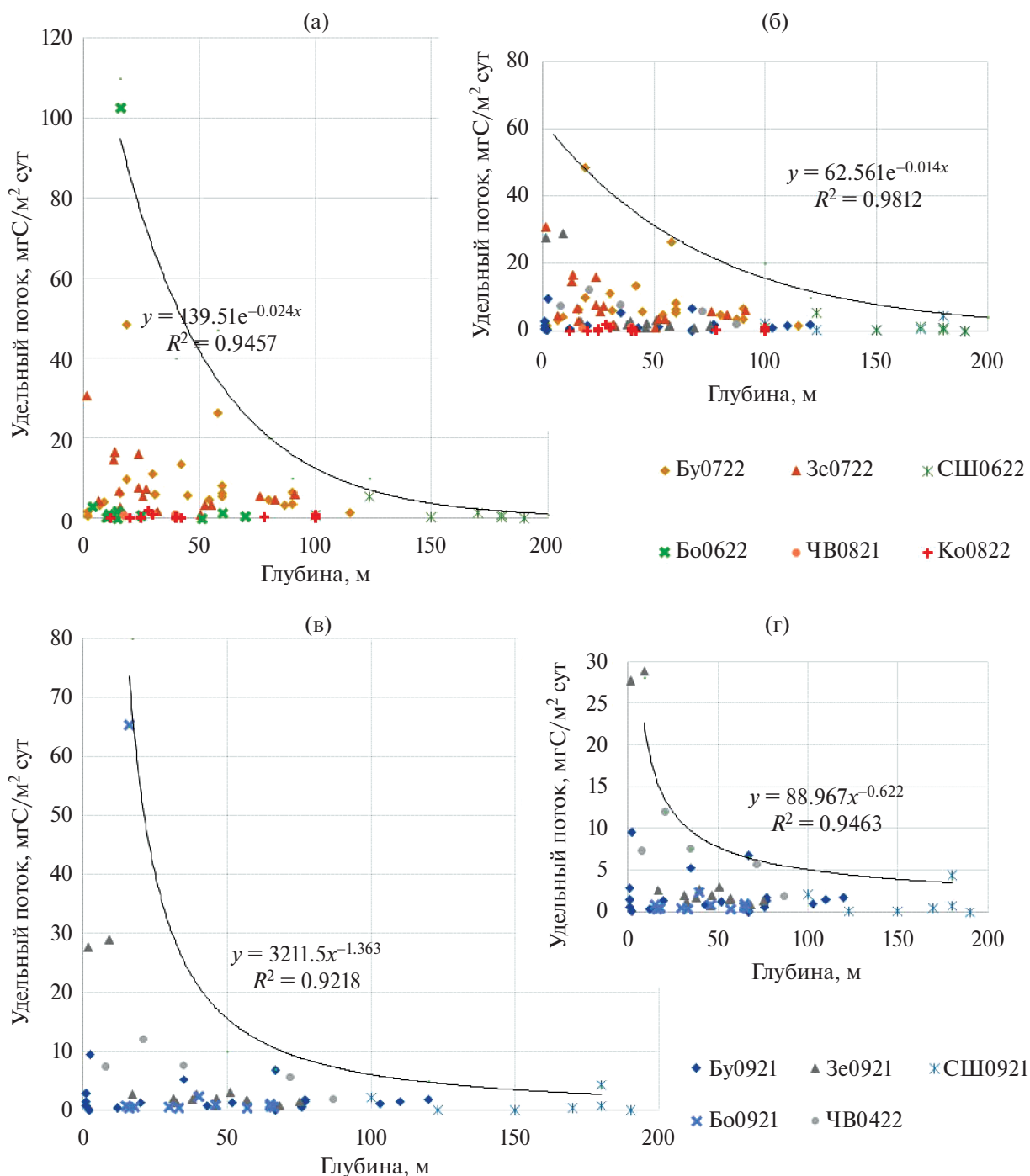


Рис. 2. Зависимость удельного потока метана от глубины с районов глубоководных водохранилищ: 2а – в периоды стратификации, 2в – при отсутствии стратификации, 2б и 2г – без учета локального максимума в Ковинском плесе Богучанского водохранилища (затопленное болото).

авторами и их коллегами на разнотипных водохранилищах РФ с учетом их пространственно-временной изменчивости. В этом массиве представлены многолетние данные съемок водохранилищ, выполненные коллективами ИФА им. А. М. Обухова РАН, ИВП РАН и кафедры гидрологии суши МГУ с 2018 г. Съемки водохранилищ производились на сетке намеченных станций

с учетом морфологии и морфометрии водохранилищ. Количество станций для водоемов, их продольное и поперечное расположение различалось и зависело от технических возможностей экспедиционных групп. Минимальная программа включала измерения над русловыми станциями вдоль водохранилища, по возможности выполнялись поперечные разрезы для охвата затопленной

Таблица 2. Доля площади мелководий при НПУ водохранилищ

Водохранилище	Доля площади мелководий, %
Иваньковское	48
Рыбинское	21
Горьковское	24,9
Куйбышевское	15,3
Волгоградское	15,7
Можайское	13,3
Озернинское	20,5
Цимлянское	13,7
Чиркейское	3,5
Бурейское	6

поймы и террасы. На каждой станции измерений производился комплекс работ, включавший определение глубины, измерение вертикального распределения температуры, электропроводности и растворенного кислорода в водной толще, измерение метеорологических параметров, прозрачности воды, фиксация особых явлений (цветение, волнение и др.), отбор проб воды и воздуха для анализа содержания метана. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом «headspace» [Bastviken et al, 2010]. Измерение удельного потока метана в атмосферу производилось методом плавучих камер [Bastviken et al, 2004]. Содержание метана в отобранных пробах определялось в лаборатории ИФА РАН на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2, согласно [РД 52.44.816–2015]. Измерения производились в разные сезоны, охватывая различное гидроэкологическое состояние водоемов (стратификацию, перемешивание, различное положение уровня воды, периоды аноксии или цветения).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительный анализ результатов измерения удельного потока метана показал, что его наибольшие значения на водохранилищах различных районов РФ (Сибири, Кавказа, равнинной части Европейской территории России), существенно различаются [Репина и др., 2022, Гречушников и др., 2022]. Для дальнейшего анализа водохранилища были сгруппированы по признаку максимальной глубины. На большинстве глубоководных водохранилищ Сибири удельный поток метана даже в летний период при максимальном прогревании и наличии стратификации был на порядок ниже, чем на водохранилищах ЕТР.

Исключения составили Ковинский плес Богучанского водохранилища, который представляет собой затопленное болото, а также верховья Зейского водохранилища, куда впадает приток Арги, дренирующий заболоченный водосбор, воды которого содержат значительное количество метана [Терский и др., 2022]. Содержание метана в воде волжских водохранилищ на порядок больше, чем в сибирских. В Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах местами встречаются максимумы концентрации метана из-за локальных особенностей: слабопроточные участки — заливы, в которых наблюдается стратификация и дефицит кислорода, либо загрязнение.

Особая роль в эмиссии метана из водохранилищ принадлежит мелководьям. С одной стороны, поток метана с участков, заросших макрофитами, велик, а с другой, далеко не все водоемы, даже равнинные, имеют значительные площади, занятые высшей водной растительностью. Либо пик ее развития приходится на конец лета, когда уровень водоема снижается и увеличивается площадь с небольшими глубинами, где освещение проникает во всю толщу воды. Например, Иваньковское водохранилище наиболее мелководно среди волжских водохранилищ и наиболее сильно зарастает, особенно в пределах Шошинского плеса [Иваньковское..., 2000]. Можайское водохранилище, напротив, относительно глубоководно, значительное развитие высшей растительности наблюдается на небольших площадях, в основном в верховьях и сильно зависит от положения уровня воды. В глубоководных водохранилищах каньонного типа доля макрофитов в образовании органического вещества мала из-за значимых колебаний уровня воды (на Чиркейском водохранилище, например, до нескольких десятков метров), ограничивающих их произрастание. Высшая водная растительность активно участвует в образовании и эмиссии метана: выявлено возрастание эмиссии метана в период массового отмирания макрофитов в воде для мелководной части Рыбинского водохранилища [Дзюбан, 2002]. С другой стороны, обнаружено сокращение содержания и эмиссии метана при наличии плавающих макрофитов [Fonseca et al, 2017]. Из-за относительно небольшой доли площади макрофитов в водохранилищах и недостаточной изученности вопроса этой составляющей в настоящей работе пренебрегли.

Для определения максимально возможного потока метана в выделенных группах водохрани-

Таблица 3. Годовая эмиссия метана с поверхности некоторых водохранилищ

Водохранилище	Макс. годовая эмиссия, тС	Год	Средний поток*, мгС/м ² ·сут	Годовая эмиссия, тС
Можайское	1044	2017	23,8	260
		2018	20,8	199
		2019	32,9	292
Озернинское	805	2019	22,7	130
Иваньковское	9947	2020	13,1	1598
Горьковское	51001	2017	14,0	8100
		2018	7,4	4275

*по данным измерений

лищ данные съемок были нанесены на диаграммы и построены огибающие, которые можно использовать для оценки удельного потока метана в случае неизученных водоемов. Результаты для полного массива данных наблюдений на 14 водохранилищах приведены на рис. 1, для глубоководных водохранилищ с максимальными глубинами более 40 м на рис. 2, для мелководных с максимальными глубинами до 40 м на рис. 3. Выделение групп водохранилищ имеет физический смысл не только по признаку глубины, но и по признаку равнинные/горные. Условия формирования стока, его вещественный состав, и освоенность водосборов равнинных водохранилищ существенно отличаются от исследованных горных водохранилищ Сибири и Кавказа. Для уточнения сезонного хода внутри каждой группы отдельно проанализированы данные об удельном потоке метана для периода с наличием стратификации (фаза летнего нагревания) и при ее отсутствии (фаза конвективного перемешивания). Измеренные потоки в различные экспедиционные кампании не осреднялись, поскольку погодные условия и проточность, а соответственно и гидроэкологический режим водоемов год от года различались. В табл. 1. приведены сведения о периоде проведения измерительных кампаний, количестве измерений и аббревиатура, используемая в дальнейшем на рисунках.

Огибающие, которые характеризуют максимально возможные значения удельного потока метана на данной глубине, описываются степенной или экспоненциальной зависимостью. Наиболее контрастные условия по величине удельного потока присущи водохранилищам выделенных групп в период наибольшего прогревания. При этом наличие бескислородного слоя в придонных горизонтах водоема не является обязательным условием максимальных значений потока метана. Так, на Иваньковском водохранилище сезонно-

го регулирования стока с коэффициентом водообмена 8,3 год⁻¹ [Эдельштейн, 1998] наибольший поток метана был выявлен не в августе 2022 г. при наличии мощной бескислородной зоны и значительной стратификации, которая бывает в проточных водоемах только при длительном стоянии жаркой погоды, а в 2021 г. [Гречушникова и др., 2021] Наоборот, значения потока метана в жаркую штилевую погоду при бурном развитии фитопланктона выявлены на порядок ниже. Это было обусловлено перенасыщением эпилимниона кислородом, выделяемым при активном фотосинтезе. Полученные результаты могут свидетельствовать о положительной роли цветения евтрофных водоемов, поскольку при этом поглощается углекислый газ, а выделяемый из донных отложений метан окисляется.

В группе глубоководных водохранилищ значения максимального потока в период прогревания и конвективного перемешивания различаются незначительно, в то время как в группе мелководных водохранилищ — в 10 раз. Малые значения удельного потока метана в первой группе обусловлены их трофическим статусом и хорошей аэрацией водной толщи. Низкие значения температуры воды в придонных слоях являются причиной меньшей активности метанообразующих микроорганизмов, большая глубина — более полное окисление метана в водной толще. Поэтому ошибка определения средней годовой величины потока метана в группе мелководных водоемов может быть больше. Повысить точность оценки возможно при проведении более детальных всесезонных наблюдений на мелководных водохранилищах.

Состояние мелководных водохранилищ более изменчиво в зависимости от проточности, уровня и погодных условий конкретного года. Также для мелководных водохранилищ выделяется неопределенность значений потока для интервала глубин менее 10 м. Хотя в целом чем меньше глубина, тем

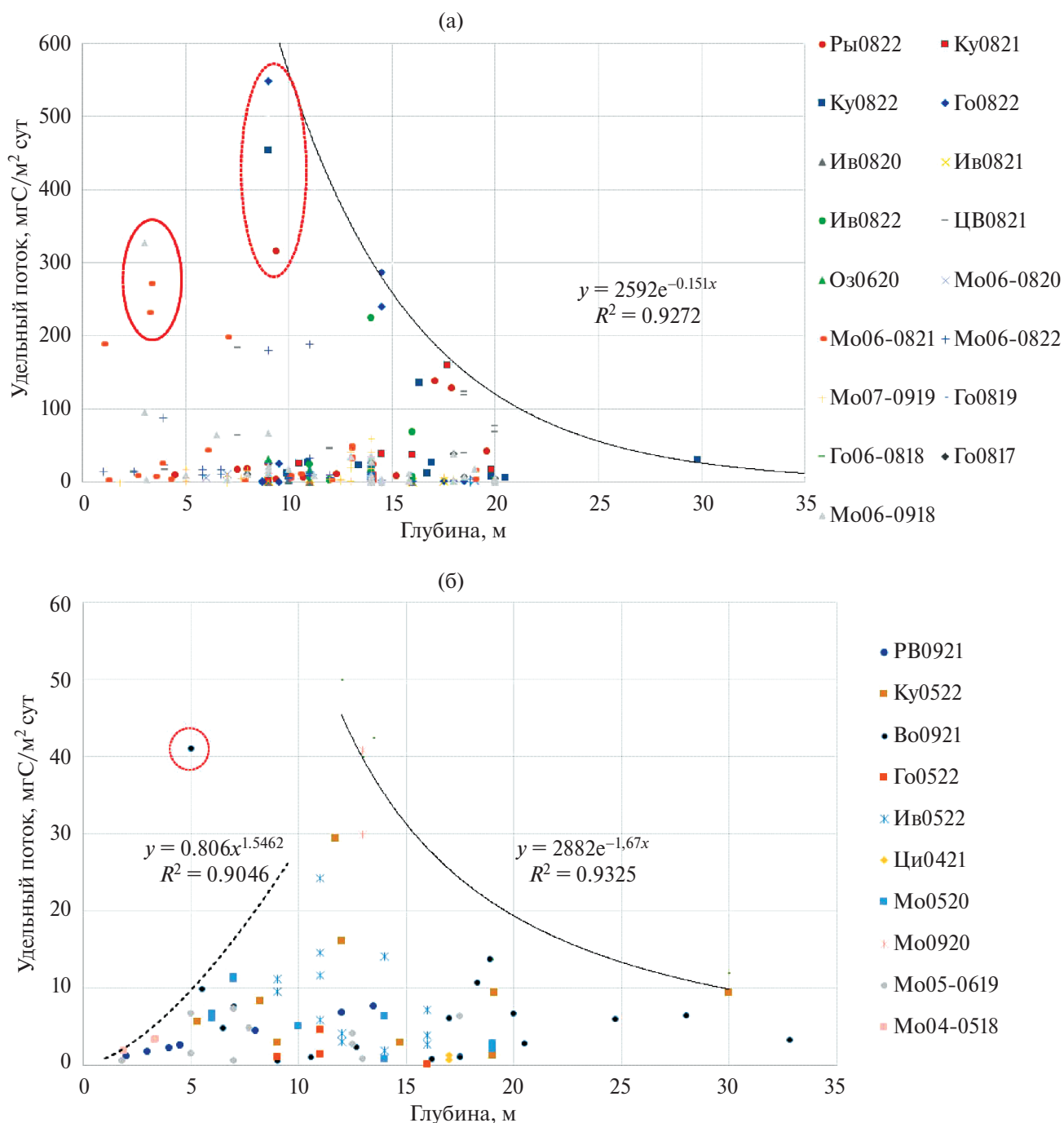


Рис. 3. Зависимость удельного потока метана с районов мелководных водохранилищ разной глубины: (а) — в период стратификации, (б) — при отсутствии стратификации.

больше вероятность перемешивания водоема до дна и снижения значения потока из-за аэрации. В период стратификации литораль может давать довольно значительный вклад в эмиссию (рис. 3а). Неопределенность значений удельного потока с мелководий связана также и с различным составом донных отложений. Это могут быть как песчаные отложения с минимальной долей органики, которым присущи невысокие значения потока, так

и богатый органикой ил в малопроточных заливах, являющийся субстратом для произрастания макрофитов и результатом их отмирания и разложения. И если данные о потоках с различных экотопов можно найти в литературе, то эмиссия метана с зоны осушки, которая имеется у всех водоемов, регулирующих сток, практически не изучена. Учет дифференциации потока метана с такой детальностью возможен только при наличии данных о ха-

рактуре берегов, донных отложений у береговой полосы и уровненом режиме. С другой стороны, площадь мелководий в водохранилищах различна. Если рассчитать долю площади мелководий с глубиной менее 2 м при уровне, соответствующем НПУ, то видно, что у многих водоемов она относительно невелика (табл. 2).

Среди исследованных водоемов по площади мелководий выделяется Ивановское водохранилище из-за обширного мелководного Шошинского плеса. На крупнейших водохранилищах волжского каскада мелководья составляют 15–20% площади. Причем на Рыбинском водохранилище сравнительно велико распространение песчаного грунта: масса крупнозернистого осадочного материала накапливается в прибрежье (0–6 м), занимающем свыше 50% площади водохранилища, а на глубинах от 6 до 10 м встречаются переходные типы донных отложений — илистый песок и песчанистый ил [Законнов и др., 2015]. Следовательно, при параметризации удельного потока метана с водохранилищ необходимо учитывать характер грунта на разных интервалах глубин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенного анализа предложена методика оценки максимальной годовой эмиссии с поверхности водохранилищ. Для ее реализации необходимо произвести периодизацию термического цикла исследуемого водоема по данным измерений, моделирования или принять по аналогу. В период ледостава при его наличии удельный поток метана принимается равным нулю. В соответствии с глубиной водоема и характеристиками его водосбора необходимо классифицировать его для выбора нужной диаграммы. Далее следует выделить в водоеме характерные зоны в соответствии с распределением глубин и батиметрическими кривыми. Для глубоководных водохранилищ авторы рекомендуют принять интервал 10 м, для мелководных 5 м. Для периодов стратификации следует воспользоваться диаграммами на рис. 2а, б, 3а, для периодов полного перемешивания — диаграммами 2в, г и 3б. Для глубоководных водохранилищ для интервала глубин менее 20 м предлагается использовать максимальное измеренное значение в данном интервале с учетом типа грунта или затопленного ландшафта (для болота, как в случае с Ковинским плесом Богучанского водохранилища — рис. 2а, в, для илистого вторичного грунта — рис. 2б, г). Для

мелководных водохранилищ для интервала глубин менее 10 м ситуация наиболее сложная. В этот интервал входят илистые вторичные грунты, богатые органическим веществом, заросли макрофитов на мелководьях и песчаные отложения. Для параметризации потока предлагается использовать средние из максимальных измеренных значений удельного потока (на рис. 3а обведены овалом): для интервала глубин 0–5 м — 275 мгС/м² сут, для интервала глубин 5–10 м — 440 мгС/м² сут. Следует отметить, что большинство съемок водохранилищ производилось на станциях вдоль затопленной русловой ложбины и над поймой. Подробные разрезы, включавшие все затопленные морфологические участки долины, выполнялись только на Можайском водохранилище. Поэтому данное направление исследований, включая измерения потока метана с зарослей укорененных и плавающих макрофитов, а также с зоны осушки является перспективным.

Предложенная методика применена к ряду водохранилищ, для которых ранее выполнены расчеты годовой эмиссии метана методом IPCC [<http://www.ipcc.ch/>]. Использованы батиметрические кривые из [Гидрометеорологический..., 1975; Эдельштейн, 1979]. Результаты приведены в табл. 3. Отметим, что согласно рекомендациям IPCC необходимо рассчитать средневзвешенный поток метана по данным измерений и экстраполировать его на безледный период. При такой оценке эмиссия метана будет завышена, если измерения производились в конце периода стратификации, когда в водохранилищах обычно наблюдаются наибольшие значения потока метана, и занижена, если наблюдения производились весной или осенью.

Средневзвешенные значения удельного потока метана по данным измерений отличаются год от года и зависят от погодных условий и уровня воды. Наибольшая разница в оценке максимальной и средневзвешенной эмиссии получилась для Горьковского водохранилища, поскольку измерения в 2017–18 гг. на нем производились только над русловой ложбиной, а рис. 3 включает измерения как в русле, так и на пойме. Для других водохранилищ максимальный поток примерно в 5 раз выше оценок по данным средневзвешенного потока. На примере Можайского водохранилища видно, что удельный поток метана может различаться год от году более, чем на 35%.

Для точной оценки его характерных средних значений потребуется период не менее 30 лет регулярных измерений, как и для оценки любых климатических величин. Для оперативных оценок возможно количественно обобщить в виде огибающих определенные во время экспедиционных работ значения удельного потока метана, описываемых экспоненциальной или степенной зависимостью и использовать их как для неизученных водоемов, так и для оценки эмиссии с водоемом с редкой сетью станций наблюдений. Полученные результаты имеют практическую значимость для оценки характерных значений выбросов парниковых газов (метана) с поверхности искусственных водоемов при расчетах их углеродной нейтральности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Единичные измерения удельного потока метана в период открытой воды не являются репрезентативными для расчета годовой эмиссии с водоема из-за значительной межгодовой изменчивости.

В группе глубоководных водохранилищ значения максимального потока в период прогревания и конвективного перемешивания различаются незначительно, в то время как в группе мелководных водохранилищ – в 10 раз.

Предложена методика оценки максимальной годовой эмиссии с поверхности водохранилищ.

Продолжение исследований изменчивости удельного потока метана рекомендуется в отношении его пространственной неоднородности для различных морфологических частей затопленной речной долины, зарослей укорененных и плавающих макрофитов, а также с зоны осушки.

Дополнительные исследования требуются для мелководных водохранилищ в интервале глубин 0–10 м для уточнения параметризации потока.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ПАО Русгидро за содействие в проведении полевых работ. Авторы благодарят коллег – сотрудников Географического факультета МГУ, НИВЦ МГУ, ФГБУ ГОИН, ИФА РАН, ИВП РАН, ИПФ РАН проводивших полевые работы: Фролову Н.Л., Агафонову С.А., Горина С.Л., Терского П.Н., Артамонова А.Ю., Степаненко В.М., Василенко А.Н., Григорьева В.Ю., Лисину А.А., Мишина Д.В., Сазонова А.А., Соколова Д.И., Тимошенко А.А., Ломову Д.В., Молькова А.А.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Финансовая поддержка: работа выполнена в рамках проекта РНФ 24–27–00034.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Готлиб Я.Л. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 203 с.
- Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71.
- Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А. Пространственно-временные различия эмиссии метана с поверхности Иваньковского водохранилища // Труды 6-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2021»). Выпуск 4. г. Н. Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». 2021, URL: http://vf-река-море.рф/ECO/2021/PDF_ECO/eco8.pdf (дата обращения 02.02.2022)
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Ломова Д.В., Ломов В.А. Результаты натурных измерений потока метана с разнотипных водохранилищ // Изв. Иркутского государственного университета. Серия Науки о земле. 2022. Т. 40. С. 3–13.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 292 с.
- Дзюбан А.Н. Метан и микробиологические процессы его трансформации в воде верхневолжских водохранилищ // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 1. С. 68–78.
- Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молодцов Д.В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
- Законнов В.В., Литвинов А.С., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги // Водное хозяйство России. 2015. № 4. С. 21–35.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Терский П.Н., Горин С.Л., Гречушникова М.Г. и др. Гидрологические условия эмиссии метана из Зейского водохранилища в теплый и холодный период 2021–2022 гг. // Эмиссия парниковых газов сегодня и в геологическом прошлом: источники, влияние на климат и окружающую среду. Казань: Издательство Казанского университета, 2022. С. 46.
- 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.
- Руководящий документ. Массовая концентрация метана и диоксида углерода в приземном слое атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии РД 52.44.816–2015.

- Садчиков А. П., Кудряшов М. А. Экология прибрежно-водной растительности. М.: Изд-во НИА-Природа, РЭФИА, 2004. 220 с.
- Степаненко В. М., Гречушникова М. Г., Репина И. А. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 76–99.
- Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Копицентр, 2005. 329 с.
- Адельштейн К. К. Морфология и морфометрия водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 24–37.
- Адельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Aben R. C. H., Barros N., van Donk E. et al. Cross continental increase in methane ebullition under climate change // Nature Communications. 2017. 8(1). P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01535-y>
- 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. 44(14). P. 5450–5455.
- Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biochemical Cycles. 2004. 18. doi:10.1029/2004GB002238.
- Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // Springer. BioScience, 2016, Vol. 66. № 11. P. 949–964.
- Fonseca A. L. dos S., Marinho C. C., Esteves F. de A. Floating Aquatic Macrophytes decrease the methane concentration in the water column of a tropical coastal lagoon: implications for methane oxidation and emission // Brazilian Archives of Biology and Technology. 2017. 60. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160381>.
- Johnson M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. V. 126. № 8. <https://doi.org/10.1029/2021JG006305>.
- Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Washington: Environmental Science and Technology, Vol. 1, 2016, 1–11 pp.
- Lovelock C. E., Evans C., Barros N. et al. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC chap. 7. 2019. V. 4, P. 7.1–7.54.
- Rosentreter J. A., Borges A. V., Deemer B. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. V. 14. № 4. P. 225–230.
- Sieczko A. K., Duc N. T., Schenk J. et al. Diel variability of methane emissions from lakes // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. V. 117(35). P. 21488–21494. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006024117>
- Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A. et al. LAKE2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // EGU: Geoscientific Model Development. 2016. 9. P. 1977–2006. <http://www.ipcc.ch/>
- Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. 2012. 410 p.
- Tranvik L. J., Downing J. A., Cotner J. B. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. P. 2298–2314.
- Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes. Berlin: Springer. 2005. 732 p.
- Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs // Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012. P. 69–94. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23571-9_4.
- UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs/IHA. 2013. 41 p.

METHOD FOR ESTIMATING THE HIGHEST SPECIFIC METHANE FLUX FROM THE SURFACE OF RESERVOIRS

M. G. Grechushnikova^{1,2,*}, I. A. Repina², V. S. Kazantsev², V. A. Lomov^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1–2, GSP-1, Moscow, 199991 Russia*

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: allavis@mail.ru*

The paper summarizes the results of the database of changes in the specific methane flux at various types of water reservoirs in Russia, in which the authors participated. Measurements were carried out by the method of “floating chambers” in different periods of the annual hydro-ecological cycle. Comparison of the obtained data with the results of foreign experience is given. An approach to parameterization of specific methane flux for calculating the maximum possible methane emission from artificial reservoirs when developing quantitative quotas of greenhouse gas emissions is proposed. The estimation both in different phases of regime (stratification, homothermia) and for separate morphological parts of reservoirs differing in depth is offered.

Keywords: reservoir, methane, emission, depth, water exchange