

УДК 556.55:627.8

## ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2025 г. А. А. Романовская<sup>a,\*</sup>, П. Д. Полумиева<sup>a</sup>, И. А. Репина<sup>b,c</sup>, А. А. Трунов<sup>a</sup>,  
В. М. Степаненко<sup>c</sup>, В. А. Ломов<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,  
Глебовская ул., 20Б, Москва, 107258 Россия

<sup>b</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

<sup>c</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, стр. 4, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: an\_roman@igce.ru

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 11.10.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

В работе выполнена оценка антропогенных выбросов и поглощений парниковых газов водохранилищами энергетического назначения Российской Федерации по результатам полевых измерений 2021–2023 года. Измерения потоков метана с поверхности водохранилищ были проведены сотрудниками Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на мелководных и глубоководных частях бассейнов девяти водохранилищ (Колымское, Бурейское, Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское, Саяно-Шушенское). По этим измерениям и данным физико-математического моделирования нами был проведен анализ и сопоставление полученных результатов с коэффициентами эмиссии метана, представленными в методических документах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Нами разработаны уточненные коэффициенты с использованием Уровней 1 и 2 сложности расчетов согласно МГЭИК. Результаты показывают, что уточненные национальные коэффициенты в среднем на 63% ниже коэффициентов МГЭИК, принятых по умолчанию. Разработана методика оценки антропогенной составляющей баланса парниковых газов при строительстве водохранилища по Уровню сложности 3 на основе балансовых расчетов углерода и разницы между характеристиками воды водохранилища и реки выше по течению. На примере Рыбинского водохранилища оценена антропогенная составляющая потока парниковых газов, соответствующая нетто-поглощению в 0.18 кг CO<sub>2</sub>-экв/м<sup>2</sup> в безледный сезон. Сделан вывод о возможности отрицательного углеродного следа электроэнергии крупных ГЭС.

**Ключевые слова:** водохранилища, парниковые газы, метан, выбросы, источники, поглощение

**DOI:** 10.31857/S0002351525020076, **EDN:** GJWYNZ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гидроэнергетика входит в перечень возобновляемых источников энергии [IPCC, 2011; Kougias, 2020; Vega, 2016]. Тем не менее, в настоящее время среди экспертов нет единого мнения относительно статуса крупных гидроэнергетических объектов по их вкладу в глобальное изменение климата [Zhao et al., 2021; Tranvik et al.,

2009; Fearnside, 1995; Fearnside, 2006; Rosa et al., 2004; Giles, 2006]. Затопление наземных экосистем и изменение гидрологического режима рек способствует росту эмиссии метана в атмосферу с поверхности водохранилищ [St. Louis et al., 2000; Lévassieur et al., 2021; Ion et al., 2021]. При этом метан характеризуется почти в 25–28 раз большим парниковым воздействием, чем угле-

кислый газ [IPCC, 2021]. Метан образуется при анаэробном разложении органического вещества, которое продуцируется непосредственно в экосистеме искусственного водоема (автохтонное органическое вещество) в дополнение к тому органическому веществу, которое поступает в воду реки с территории ее естественного водосбора (аллохтонное органическое вещество). По данным [Johnson et al, 2021] среднемировая годовая эмиссия метана от водохранилищ может достигать значений до  $34.1 \text{ г/м}^2$ , при этом в тропической зоне интенсивность эмиссии выше ( $44.8 \text{ г/м}^2$ ), чем в бореальной ( $6.1 \text{ г/м}^2$ ), что обусловлено более высокими средними температурами и более длительным (или круглогодичным) вегетационным периодом.

Национальные кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Парижского соглашения должны включать все антропогенные потоки этих газов. Если с источниками и выбросами в индустриальных отраслях экономики вопросов обычно не возникает, то включение того или иного потока (выбросы или поглощение) в отчетность сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) требует дополнительного обоснования и атрибуции к результату деятельности человека. Согласно методическим рекомендациям Межправительственной группы экспертов по изменению климата для национальных кадастров [МГЭИК, 2006] наиболее распространенным подходом является включение в отчетность только так называемых управляемых экосистем (в случаях, когда отделить эффект хозяйственной деятельности от естественных явлений достоверно практически невозможно). Такой подход, в частности, применяется для лесных экосистем [МГЭИК, 2006; IPCC, 2019]. На территории управляемых лесов все потоки считаются антропогенными и включаются в отчетность, а на территории неуправляемых — напротив, все потоки считаются естественными и в отчетность не включаются. Более достоверным и сложным подходом для оценки именно антропогенного вклада является рассмотрение и обоснование каждого потока в отдельности и выявление степени воздействия на него интенсивности хозяйственной деятельности. Такой подход в кадастрах применяется, например, для оценки эмиссии закиси азота

от пахотных почв: оценивается только эмиссия от внесенных в почвы человеком источников азота и исключается естественная почвенная эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$  [МГЭИК, 2006; IPCC, 2019].

Методические рекомендации МГЭИК [МГЭИК, 2006; IPCC, 2019] для затопленных земель предлагают иерархическую систему методов оценки потоков парниковых газов по их сложности (от простого Уровня 1 с использованием коэффициентов по умолчанию до Уровня 3, предусматривающего натурные измерения и/или использование динамических математических моделей), основанную на расчете общей эмиссии парниковых газов с поверхности воды в атмосферу. Аналогично по трем уровням сложности подразделяют и используемые коэффициенты. Надо отметить, что подход по оценке только поверхностной эмиссии от водохранилища отличается от рекомендаций МГЭИК для других управляемых экосистем, где рассматривается баланс потоков углерода и учитывается накопление и хранение органики в самой экосистеме, что может приводить в итоге как к нетто-эмиссии, так и нетто-поглощению в экосистеме. Недостаточный учет факта накопления органического вещества в искусственных водоемах, особенно при затоплении равнинных рек, по-видимому, приводит к завышению вклада водохранилищ в антропогенные выбросы парниковых газов по методике МГЭИК.

Кроме того, многие исследования показывают, что ненарушенные реки также являются источником эмиссий метана [Andrews et al., 2021; Crawford et al., 2017; Bretz et al., 2021; Robison et al., 2021; Stanley et al., 2023]. При этом абсолютная величина эмиссий хотя и меньше, но сопоставима со значениями для водохранилищ. Например, в работе [Bastviken et al., 2011] годовая эмиссия  $\text{CH}_4$  варьирует от  $2.5 \text{ г/м}^2$  в высоких широтах ( $54\text{--}66^\circ$ ), до  $5.1 \text{ г/м}^2$  в низких широтах ( $< 24^\circ$ ). Учитывая, что в результате строительства водохранилища новых источников воды не появляется, но изменяются условия скорости течения и время пребывания воды на данной территории, для отчетности в рамках РКИК ООН и Парижского соглашения корректно применять более сложный подход по оценке воздействия деятельности человека на интенсивность природных процессов и атрибуции антропогенного вклада. В таком случае, общие коэффициенты эмиссии метана с поверхности воды водохранилищ представляют со-

бой суммарный естественный и антропогенный поток, который необходимо разделить.

Задачей нашей работы было уточнение коэффициентов МГЭИК по эмиссии метана из водохранилищ, рекомендуемых по умолчанию для использования в природно-климатических зонах Российской Федерации, сопоставление расчетов по 1 и 2 Уровням сложности МГЭИК, а также предварительные оценки по методу Уровня 3 с вычленением антропогенного воздействия на интенсивность эмиссии метана в результате затопления земель на примере Рыбинского водохранилища. Отметим, что в нашу задачу входило рассмотрение только «старых» водохранилищ (за исключением Богучанского), строительство которых закончилось более, чем 20 лет [IPCC, 2019], где потоки парниковых газов уже не связаны с разложением затопленной биомассы и органики наземных экосистем.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки уточненных национальных коэффициентов и национальной методики оценки антропогенных потоков парниковых газов в водохранилищах ПАО РУСГИДРО в 2021 году была организована научно-исследовательская работа (договор НИР № 1010-416-2021, далее – НИР) по экспериментальному наблюдению эмиссии и содержания в воде метана, потоков углекислого газа, а также иных характеристик углеродного цикла водохранилищ в течение последовательных 3-х лет (2 квартал 2021 г. – 1 квартал 2024 г.). Исследования выполнялись коллективами трех учреждений: полевые и экспериментальные исследования проводились сотрудниками Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН под руководством проф., д.ф.-м.н. Репиной И.А., моделирование цикла метана и углерода в водохранилищах выполняли в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством д.ф.-м.н. Степаненко В.М., разработкой национальных коэффициентов, основанных на полевых и экспериментальных данных, и национальной методологии для отчетности в кадастре занимался коллектив Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля под руководством д.б.н. Романовской А.А.

Исследования антропогенных потоков парниковых газов проведены на девяти водохранили-

щах (Колымское, Бурейское, Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское, Саяно-Шушенское) [Репина и др., 2022].

### *Методика натуральных измерений*

Измерения производились в соответствии с руководством по полевым и расчетным методам определения эмиссии метана Международной ассоциации гидроэнергетиков (International Hydropower Association (ИНА)), в сотрудничестве с международной гидрологической программой ЮНЕСКО (International Hydrological Programme (IHP) of UNESCO) [Goldenfum, 2010]. Измерения выполнялись по календарным сезонам года (весна, лето, осень, зима) не менее одного раза в каждый сезон за период 2021–2023 гг. Длительность измерительных кампаний варьировала из года в год, но в среднем составляла не менее 5 дней за сезон. Измерения проводились в дневное время с плавсредства методом плавучих камер [Bastviken et al., 2020; Rodríguez–García et al., 2023] без экрана от пузырьковой эмиссии. Пробы воздуха из камер отбирались во флаконы с соевым раствором, а потом обрабатывались в лаборатории на хроматографе. Удельные потоки метана рассчитывались по разнице концентраций в камере в конце и начале периода экспозиции без разделения на диффузионную и пузырьковую составляющую по формуле:

$$F = \frac{\Delta C \cdot 10^{-6} \cdot P \cdot V \cdot M}{R \cdot T \cdot A \cdot t}, \quad (1)$$

где  $F$  – удельный поток метана, мг  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ ;  $\Delta C$  – изменение концентрации газа в камере за время экспозиции, ppm;  $P$  – атмосферное давление, Па;  $V$  – объем камеры,  $\text{м}^3$ ;  $M$  – молярная масса газа, 16040 мг/моль для метана и 44010 мг/моль для углекислого газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8.314463 Дж/(моль · К);  $T$  – температура воздуха, К;  $A$  – площадь основания камеры,  $\text{м}^2$ ;  $t$  – время экспозиции, сутки.

На Колымском водохранилище было выполнено 386 измерений, на Бурейском – 631, на Волгоградском – 485, на Богучанском – 411, на Зейском – 1422, на Куйбышевском – 1002, на Рыбинском – 885, на Чиркейском – 509, на Саяно-Шушенском – 309. Для определения пространственно-временной изменчивости удельных потоков и содержания в воде метана на водое-

мах в различные сезоны выполнялись съемки на опорных станциях, которые назначались таким образом, чтобы наиболее полно охватить различные морфологические участки (районы) водохранилищ, а также мелководья и крупные заливы. Также станции назначались в зоне выклинивания подпора, при впадении основных притоков, вдоль основной оси водоема, на заросших макрофитами и свободных от них участках, в приплотинном районе вблизи водовыпусков с учетом глубины осей водоводов, в нижнем бьефе и на удалении от плотины. Для осреднения использовались данные цифровых моделей рельефа каждого водохранилища (ЦМР). Согласно [Goldenfum, 2010; IPCC, 2019] каждое водохранилище разделялось на характерные участки. Оценки средних удельных потоков (УП) метана за каждую полевую кампанию на водохранилищах были получены на основе измеренных суммарных потоков на станциях измерений. Потоки в каждой точке измерений были использованы для осреднения по площади всего водоема с учетом разделения водохранилища на квазиоднородные районы, выделенные с учётом рельефа дна и близости притоков. Измерения потоков метана сопровождаются измерением вертикального профиля температуры, электропроводимости, концентраций растворенного метана и кислорода в водной толще, а также метеорологических величин в атмосфере. Горизонты отбора проб воды для последующего анализа на концентрацию растворенных газов выбирались у поверхности, у дна, над слоем скачка температуры, под слоем скачка, в слое скачка. На отдельных водохранилищах проводились оценки химического состава воды.

Отбор проб воды для определения содержания общего углерода и его компонентов (органического общего углерода в растворенном и взвешенном состоянии) в воде водохранилищ производился из приповерхностного и придонного горизонтов на сетке репрезентативных станций на каждом исследуемом водохранилище в банки темного стекла объемом 125 мл в соответствии с требованиями ГОСТ 31861, ГОСТ 31862 и ГОСТ 17.1.5.05. Затем пробы фиксировались с помощью 1–2 мл ортофосфорной кислоты. Хранение проб производилось при температуре 2–8°C не более 30 суток. Содержание общего углерода определялось в фильтрованной и нефилтрованной части пробы на анализаторе Elementar «Vario TOC Select» в сертифицированной лаборатории.

Определения содержания органического вещества в донных отложениях водохранилищ производили методом потерь веса при прокаливании (ГОСТ 23740-2016). Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана–Бэрджа, анализ производился для верхнего слоя грунта толщиной не более 10 см.

Для решения задачи определения скорости осаждения органического вещества в водоёмах были произведены постановки седиментационных ловушек в придонном слое с целью определить как скорость накопления осадка, так и содержание в веществе осажденного органического углерода (ООУ). Также использовались литературные оценки скорости осадконакопления для конкретных водохранилищ [Законнов В.В., 1993, 2007; Законнов и др., 2015; Карнаухова Г.А., 2009].

Для Чиркейского водохранилища измерения удельных потоков метана выполнялись во все сезоны года. Результаты зимних экспедиций по остальным 8 водохранилищам показывают, что зимняя эмиссия метана с их поверхности равна нулю.

Краткие характеристики водохранилищ представлены в табл. 1.

С учётом низкого временного разрешения данных измерений, для определения годового баланса парниковых газов из водохранилищ и их поглощающей способности с учётом изменчивости на всех временных масштабах использовалась математическая модель LAKE, разработанная для моделирования гидрологических, термодинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах [Stepanenko et al., 2016, 2020; Clark et al., 2022; Golub et al., 2022]. Код модели находится в открытом доступе (<https://mathmod.org/lake/>).

Специально модифицированная для расчета баланса парниковых газов водохранилищ версия модели LAKE 3.0 [Степаненко и др., 2020; Lomov et al., 2024] была оптимизирована в части параметров уравнений по результатам многочисленных натурных измерений на каждом водохранилище, благодаря чему удалось детально реалистично воспроизвести температурный, кислородный режим водоемов, а также годовой ход удельного потока метана из водохранилищ и суммарную годовую эмиссию [Отчет, 2021, 2024]. Также была получена оценка годовой эмиссии углекислого газа и скорости седиментации органического

Таблица 1. Краткие сведения о водохранилищах [Отчет, 2021]

Водо-хранилище / Характеристика	Саяно-Шушенское	Зейское	Бурейское	Богучанское	Колымское	Куйбышевское	Волгоградское	Рыбинское	Чиркейское
Уровень ВБ, м абс.	536.1	318.1-317.8	254.8-255.0	207.9	447.5 – 448.5	51.7-52.0	14.3-14.5	99.9	349.4
Кол-во станций (включая НБ)	7	19	19	17	21	10	22	14	9
Температура воды, °С: на поверхности/у дна	16.0-16.6/ 4.5-5.2	14-15/ 4.9-5.5	16-20/ 8-9	12-13/ 4-9	11-13/ 5-11	28–29/ 22-23	17-20 / 17-20	11.2-14/ 11.2-14	25-26/ 10-10.1
Выраженность и глубина СТС	Выражен, 60-100 м	Выражен, 15-20 м в верховье до 60 м у плотины	Выражен, 20 м в верховье до 40 м у плотины	Выражен, 15-18 м	Выражен, 30-45 м	выражен только в Черемшанском заливе 6.5-10.0м	отсутствует (полное перемешивание)	отсутствует (полное перемешивание)	9-12 м синоптический, 50–60 м сезонный
Наличие зоны гипоксии	Не выявлено (зондирование на 2/3 глубины)	Не выявлено	Не выявлено	Зона гипоксии только в Ковинском разливе	Не выявлено	Зона гипоксии только в Черемшанском заливе	Не выявлено	Не выявлено	Не выявлено
Период наполнения*	1975—1990 гг.	1975—1985 гг.	2003—2008 гг.	2012—2015 гг.	1980—1994 гг.	1955—1957 гг.	1958—1960 гг.	1941—1947 гг.	1970—1974 гг.
Вид регулирования	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Многолетнее
Главная река	Енисей	Зея	Буряя	Ангара	Колыма	Волга	Волга	Волга	Сулак
НПУ, м абс.	539.0	315.0	256.0	208.0	451.5	53.0	15.0	102.0	355.0
Длина, км	312	290	236	375	148	510	540	250	35.5
Ширина средняя (макс.), км	6.3 (12)	8.4 (24)	1.0 (5.0)	6.3 (15)	3 (10)	11.6 (40)	5.8 (17)	18(56)	1.2(4.0)
Площадь зеркала при НПУ, км <sup>2</sup>	608	2420	740	2326	441	6150	3117	4550	42.4
Объем при НПУ, км <sup>3</sup>	30.7	68.4	20.9	58.2	15.1	57.3	31.5	25.4	2.78
Глубина макс. при НПУ, м	220	100	125	74	121.5	41.0	41	30.4	140
Объем притока ср. годовой, км <sup>3</sup>	47.3	24.7	27.49	80.7	14.7	264.5	260	31.4	5.55

\*Здесь и ниже паспортные характеристики водохранилищ приведены по материалам электронного ресурса «Вода России» (<http://water-rg.ru>)

НБ – нижний бьеф; ВБ – верхний бьеф; СТС – слой температурного скачка

вещества в углеродном эквиваленте в донные отложения.

Основными входными данными для модели являются метеорологические условия:

- Температура воздуха
- Атмосферное давление
- Влажность воздуха
- Скорость ветра
- Нисходящие потоки длинноволновой и коротковолновой радиации
- Осадки

Временные ряды этих величин заимствовались из данных реанализа ERA5. Калибровка модели LAKE 3.0 для корректного воспроизведения потоков метана на границе «вода – атмосфера» производилась в 3 последовательных этапа:

1. калибровка параметров, определяющих температурный режим;
2. калибровка параметров кислородного режима;
3. калибровка параметров, отвечающих за эмиссию метана.

Разработанные в данной работе коэффициенты получены расчетным путем с использованием имеющихся данных полевых измерений и моделирования по каждому водохранилищу за 2021–2023 гг. [Отчет, 2024].

#### *Методика расчета коэффициентов эмиссии*

Методика оценки выбросов парниковых газов в соответствии с рекомендациями МГЭИК

#### Уровень 1

Согласно методологии МГЭИК, первоначальное обводнение земель может привести к увеличению выбросов CO<sub>2</sub> в результате разложения затопленной почвы и биомассы. После этого начального этапа, который обычно длится около 20 лет, выбросы CO<sub>2</sub> от затопленных земель в значительной степени связаны с поступлением углерода из водосборного бассейна, который относится к другим категориям управляемых земель и не учитывается в этой категории во избежание двойного учета [IPCC, 2019]. Поэтому

**Таблица 2.** Данные полевых измерений потоков метана на водохранилищах за 2021–2023 год, мг C-CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут [Отчет, 2024]

Водохранилище / Зона	Саяно-Шушенское	Зейское	Бурейское	Богучанское	Колымское	Куйбышевское	Волгоградское	Рыбинское	Чиркейское
<b>2021</b>									
Глубоководье	—	2.8	2.3	0.65	3.5	5.8	7.3	22.0	0.98
Мелководье	—	14.1	7.0	1.5	3.8	105.2	5.3	29.3	—
Река	—	51.3	3.7	4.85	2.6	56.0	1.4	4.1	1.5
<b>2022</b>									
Глубоководье	0.68	3.8	7.7	1.1	0.6	11.8	3.4	29.4	6.1
Мелководье	—	12.6	1.7	2.9	0.4	23.9	2.6	50.3	—
Река	5.29	13.4	5.9	0.5	1.7	9.5	0.3	7.3	13.7
<b>2023</b>									
Глубоководье	2.2	5.3	3.6	1.0	1.23	2.4	4.3	30.0	10.1
Мелководье	2.5	35.2	4.0	5.5	1.62	24.4	7.6	45.9	—
Река	0.17	43.4	3.2	2.5	—	19.2	—	—	—

в методическом руководстве МГЭИК не приводится какой-либо методологии для оценки общих выбросов  $\text{CO}_2$  для затопленных земель, остающихся затопленными землями (старше 20 лет), т.к. предполагается, что они компенсируются поглощением  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза макрофитами, водорослями, в т.ч. фитопланктоном [IPCC, 2019].

Общие выбросы метана от водохранилищ ( $F_{\text{CH}_4\text{tot}}$ ) определяются как сумма выбросов с поверхности водохранилища ( $F_{\text{CH}_4\text{res}}$ ) и выбросов, которые происходят ниже по течению от плотины ( $F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$ ) с использованием уравнений (2–4) [IPCC, 2019]:

$$F_{\text{CH}_4\text{tot}} = F_{\text{CH}_4\text{res}} + F_{\text{CH}_4\text{downstream}}, \quad (2)$$

$$F_{\text{CH}_4\text{res}} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{n\text{res}_j} \alpha_i \left( EF_{\text{CH}_4, \text{age}>20, j} \cdot A_{\text{tot } j, i} \right), \quad (3)$$

$$F_{\text{CH}_4\text{downstream}} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{n\text{res}_j} \alpha_i \left( EF_{\text{CH}_4, \text{age}>20, j} \cdot A_{\text{tot } j, i} \right) \cdot R_d, \quad (4)$$

где  $F_{\text{CH}_4\text{tot}}$  – суммарный годовой выброс  $\text{CH}_4$  из всех водохранилищ возрастом  $> 20$  лет, кг  $\text{CH}_4/\text{год}$ ;  $F_{\text{CH}_4\text{res}}$  – годовые выбросы  $\text{CH}_4$  с поверхности всех водохранилищ возрастом  $> 20$  лет, кг  $\text{CH}_4/\text{год}$ ;  $F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$  – годовые выбросы  $\text{CH}_4$  всех водохра-

нилищ, происходящие ниже по течению от плотины, кг  $\text{CH}_4/\text{год}$ ;  $A_{\text{tot } i, j}$  – общая площадь водной поверхности  $i$ -го водохранилища старше 20 лет, расположенного в  $j$ -й климатической зоне, га;  $EF_{\text{CH}_4, \text{age}>20, j}$  – коэффициент выбросов  $\text{CH}_4$  с поверхности водохранилищ возрастом  $> 20$  лет, расположенных в климатической зоне  $j$ , кг  $\text{CH}_4 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  (коэффициенты [IPCC, 2019] по умолчанию – табл. 3);  $R_d$  – константа, равная отношению общего выброса  $\text{CH}_4$  ниже по течению к общему потоку  $\text{CH}_4$  с поверхности водохранилища (безразмерный, по умолчанию для Уровня 1 принят равным 0.09);  $\alpha_i$  – корректировка коэффициента выбросов для трофического состояния водохранилища  $i$  в заданной климатической зоне (безразмерный, по умолчанию равен 1.0 для Уровня 1);  $i$  – номер водохранилища возрастом  $> 20$  лет в климатической зоне  $j$ ;  $j$  – номер климатической зоны ( $j = 1-6$ ).

Как указано выше, для большинства исследованных водохранилищ измерения охватывали безледный период года. Однако, с учётом полученных данных измерений в зимний период для Чиркейского водохранилища коэффициент эмиссии рассчитан за полный календарный год.

Методические рекомендации МГЭИК [IPCC, 2019] также предусматривают, что, если для водохранилища определён трофический статус, то

**Таблица 3.** Коэффициенты выбросов (кг  $\text{CH}_4 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ) для водохранилищ старше 20 лет – затопленные земли, остающиеся затопленными землями [IPCC, 2019]

Климатическая зона		Коэффициенты выбросов $\text{CH}_4$ $EF_{\text{CH}_4, \text{age}>20, j}$ (кг $\text{CH}_4 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ )		
Климат	j	Среднее	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения	N
Бореальный	1	13.6	7.3–19.9	96
Проходный умеренный	2	54.0	48.3–59.5	1879
Теплый умеренный / сухой	3	150.9	133.3–168.1	578
Теплый умеренный / влажный	4	80.3	74.0–86.0	1946
Тропический сухой / горный	5	283.7	261.9–305.8	710
Тропический влажный / влажный	6	141.1	131.1–152.7	805

Коэффициенты выбросов выводятся на основе модели G-Res для N водохранилищ в каждой климатической зоне. N – количество смоделированных водохранилищ, используемых для оценки значений EF и их 95% доверительных интервалов.

можно уточнить оценки, умножив коэффициенты выбросов  $\text{CH}_4$  на коэффициент  $\alpha_r$ , рассчитанный на основе измеренного среднегодового значения концентрации хлорофилла-а (*Chl-a*). Это позволит обеспечить более точный подход в случае, когда в водохранилище производятся изменения концентрации *Chl-a*. При этом согласно МГЭИК значения концентрации хлорофилла выше 5 мкг/л будут приводить к кратному увеличению выбросов метана от водохранилища, что, однако, не учитывает увеличение осаждения отмершего органического вещества от фитомассы водохранилища.

В данной работе данный подход по учету трофности водохранилищ не применялся, исходя из того, что мы измеряли суммарную эмиссию метана с поверхности воды, и эффект трофического статуса водохранилища уже учтён в измеренных значениях.

Коэффициенты эмиссии, представленные в табл. 3, основаны на пространственных и временных вариациях и были получены в результате применения эмпирических моделей более чем к шести тысячам водохранилищ по всему миру, а полученные коэффициенты выбросов усреднены по климатическим зонам [IPCC, 2019]. Наибольшее число данных по водохранилищам было собрано для умеренного прохладного и умеренного влажного климата, на их долю приходится

около 4000 данных измерений. На долю бореальной климатической зоны, в которой находится наибольшее количество крупных водохранилищ Российской Федерации, приходится 96 исследованных водохранилищ [IPCC, 2019].

#### Уровень 2

Исходными данными для расчетов эмиссии метана с поверхности водохранилищ по Уровню 2 служат площади водохранилищ и площади рек до того, как на них построили плотины (табл. 4). Также при расчетах учитывается высота забора воды из водохранилища.

Площади рек до затопления рассчитаны как разница площади водохранилища и площади затопленных земель по данным [Отчет, 2021].

Оценка эмиссии метана по Уровню 2 основана на тех же подходах и уравнениях, что и Уровень 1. Выбросы ниже по течению для отдельных водохранилищ можно оценить на основе глубины забора воды. При заборе воды из аэрированной (верхней) части водяного столба, согласно рекомендациям МГЭИК, считается, что содержание  $\text{CH}_4$  в воде будет относительно низкое, поэтому выбросы ниже по течению можно считать равными нулю. Если вода забирается из бескислородной (нижней) части водяного столба, где растворенный  $\text{CH}_4$  может накапливаться до высоких уровней, выбросы ниже по течению

**Таблица 4.** Площади водохранилищ и рек до строительства на них плотин, тип забора воды и средняя длительность вегетационного сезона

Наименование	Площадь водохранилища, км <sup>2</sup>	Площадь реки до заполнения водохранилища, естественный поток, км <sup>2</sup>	Забор воды	Длительность безледного сезона, сутки
Колымское	441	32.6	Верхний	165
Бурейское	740	110	Верхний	250
Волгоградское	3117	357	Нижний	239
Богучанское	2326	832	Верхний	179
Зейское	2419	124	Верхний	250
Куйбышевское	6150	1410	Нижний	212
Рыбинское	4550	329	Нижний	198
Чиркейское	42.4	12	Верхний	365
Саяно-Шушенское	608	75	Верхний	290

следует оценивать в соответствии с уравнением

$$F_{CH_4downstream} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{nres_j} \alpha_i (EF_{CH_4 age>20,j} \cdot A_{tot j,i}) \cdot R_d,$$

с использованием коэффициента  $R_d$ , или по методологии Уровня 3.

МГЭИК допускает, что при наличии достаточных данных можно также учитывать в расчётах эффект захоронения углерода в отложениях в случае нетто-поглощения углерода на управляемых затопляемых землях. Однако не предоставляет методики и коэффициентов для таких расчетов.

Согласно методологии МГЭИК [IPCC, 2019], при использовании 2-го и 3-го Уровней сложности расчетов возможно применение метода оценки вклада деятельности человека в общие выбросы от затопленных земель.

По Уровню 2 предлагается использовать площади категорий управляемых и неуправляемых земель, преобразованных в водохранилища, и вычесть территорию, которая ранее (до затопления) была в категории неуправляемых озёр, рек/ручьев и неуправляемых водно-болотных угодий из общей площади водохранилищ, на основании того, что выбросы на этих неуправляемых землях не включаются в национальные кадастры парниковых газов. Выбросы  $CH_4$  от неуправляемых озёр и рек близки к таковым от водохранилищ, поэтому, по мнению МГЭИК, этот метод является надежным. При этом существует риск занижения или завышения антропогенных выбросов парниковых газов от неуправляемых водно-болотных угодий, поскольку затопление может изменить выбросы и абсорбцию парниковых газов с этих неуправляемых земель из-за изменений в биогеохимических процессах. Однако в данный момент МГЭИК не может предоставить более точное руководство, учитывая недостаток имеющихся эмпирических данных. Предполагается, что если до затопления неуправляемые водно-болотные угодья занимали значительную часть поверхности территории, которая позднее была затоплена, то страны могут лучше оценить антропогенные выбросы на Уровнях 2 или 3. А если на этих землях в результате затопления произошли существенные изменения в гидрологии и соответственные изменения характеристик и экологической функции территории или выбросов и абсорбции на единицу площади, то такие площади неуправляемых водно-болотных угодий, по мнению МГЭИК, не могут быть ис-

ключены из расчета. Данный «площадной» подход МГЭИК как раз и свидетельствует, что при изменении гидрологических характеристик территории после затопления следует рассчитывать суммарные естественные и антропогенные выбросы с данной площади, без вычленения именно антропогенного вклада этого изменения. Это, по нашему мнению, является не совсем корректным подходом, ведущим к завышению общих выбросов.

Ориентировочные оценки антропогенной компоненты общих выбросов  $CH_4$  для затопленных земель, остающихся затопленными землями, по Уровню 2 методологии МГЭИК оцениваются по уравнению (5):

$$F_{CH_4anthrop} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{nres_j} \alpha_i (EF_{CH_4 age>20,j} \cdot A_{anthrop j,i}) + F_{CH_4downstream}, \quad (5)$$

где  $F_{CH_4anthrop}$  — оценка антропогенной составляющей общих годовых выбросов  $CH_4$  с затопляемых земель, кг  $CH_4$ /год;  $A_{anthrop j,i}$  — площадь, связанная с антропогенной составляющей выбросов и включающая все площади водной поверхности  $i$ -го водохранилища возрастом  $> 20$  лет, расположенных в  $j$ -й климатической зоне, за исключением территорий, которые были до затопления неуправляемыми водными объектами (озера и реки), га;  $F_{CH_4downstream}$  — годовые выбросы  $CH_4$  ниже по течению (уравнение (4)), кг  $CH_4$ /год;  $\alpha_i$  — поправка на коэффициент выбросов для трофического состояния водохранилища  $i$  в заданной климатической зоне (безразмерный, по умолчанию равен 1.0 для Уровня 1);  $EF_{CH_4 age>20,j}$  — коэффициент выбросов  $CH_4$  с поверхности водохранилищ возрастом  $> 20$  лет, расположенных в климатической зоне  $j$ , кг  $CH_4$  га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>.

Методика оценки нетто-выбросов парниковых газов на основе балансового метода, соответствующего Уровню 3

В нашей работе проведена предварительная оценка эмиссии и поглощения парниковых газов водными объектами на основе измерений, полученных на Рыбинском водохранилище, на основе разработанной нами методологии оценки баланса углерода экосистемы водохранилища и выделения антропогенного воздействия на ин-

тенсивность потоков углерода и эмиссии метана в этой экосистеме. Эти оценки соответствуют методологическому Уровню коэффициентов 3 по МГЭИК. Изменение баланса потоков парниковых газов в результате строительства водохранилищ может быть оценено на основании разработанной схемы (см. рис. 1).

Результирующее антропогенное воздействие на экосистему водохранилища по сравнению с рекой оценивается по следующей формуле:

$$F_{anthrop} = \sum_{i=1}^{nres_j} \left[ \left( E_{anthrop\ i} - S_{anthrop\ i} - C_{орг\_anthrop\ i} \right) \cdot A_{tot,i} \right] + F_{CH_4\ downstream} \cdot 25, \quad (6)$$

где  $F_{anthrop}$  – антропогенная составляющая баланса парниковых газов в водохранилищах  $j$ -й климатической зоны, кг  $CO_2$ -экв./год (положительная величина характеризует нетто-эмиссию парниковых газов в атмосферу, отрицательная величина – нетто-поглощение);  $E_{anthrop\ i}$  – антропогенное изменение эмиссии  $CH_4$  с поверхно-

сти воды водохранилища  $i$ , кг  $CO_2$ -экв./га/год;  $S_{anthrop\ i}$  – антропогенное изменение осадения углерода в водохранилище  $i$ , кг  $CO_2$ /га/год;  $C_{орг\_anthrop\ i}$  – антропогенное изменение содержания органического углерода в воде водохранилища  $i$ , кг  $CO_2$ /га/год;  $F_{CH_4\ downstream}$  – годовые выбросы  $CH_4$  ниже по течению (уравнение (3)), кг  $CH_4$ /год;  $nres_j$  – количество водохранилищ старше 20 лет;  $A_{tot,i}$  – общая площадь водной поверхности водохранилища  $i$  старше 20 лет, га; 25 – коэффициент глобального потепления для пересчета метана в единицы  $CO_2$ -экв.

Антропогенное изменение эмиссии метана  $E_{anthrop,i}$  рассчитывается по формулам (7–10):

$$E_{anthrop,i} = (E_{new} + E_{res}) \cdot 25, \quad (7)$$

$$E_{new} = C1 \cdot (B1 - A1), \quad (8)$$

$$E_{res} = C2 \cdot B1, \quad (9)$$

$$C1 = A2/B2, \quad (10)$$

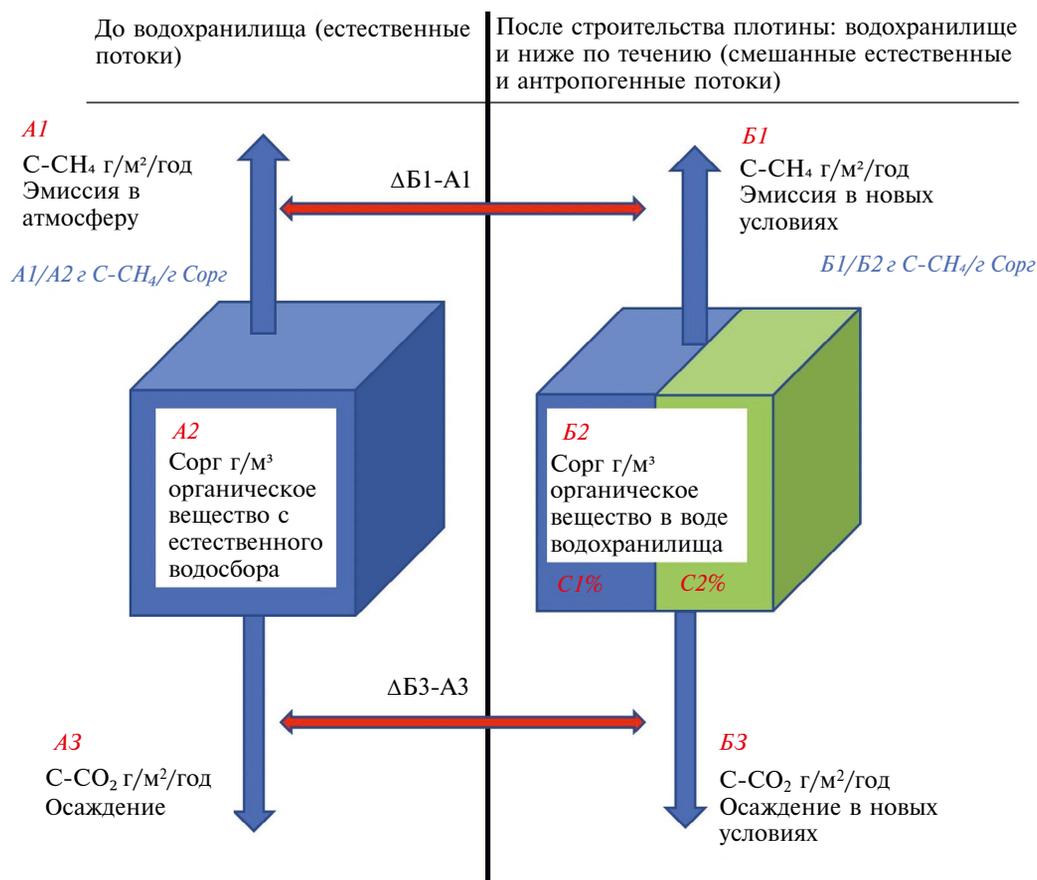


Рис. 1. Схема экспериментальной оценки антропогенной составляющей потоков парниковых газов на водохранилищах

где  $E_{new}$  — эмиссия  $\text{CH}_4$  от аллохтонного органического вещества в новых условиях, кг  $\text{CO}_2$ -экв./га/год;  $E_{res}$  — эмиссия метана от автохтонного вещества в водохранилище, кг  $\text{CO}_2$ -экв./га/год;  $A1$  — эмиссия метана в атмосферу с поверхности реки, кг  $\text{CH}_4$ /га/год;  $B1$  — эмиссия в атмосферу с поверхности водохранилища, кг  $\text{CH}_4$ /га/год;  $C1$  — доля аллохтонного вещества в водохранилище от суммарной массы органического вещества, безразмерный;  $C2$  — доля автохтонного органического вещества водохранилища от суммарной массы органического вещества ( $= 1 - C1$ ), безразмерный;  $A2$  — концентрация органического углерода в воде реки, кг С орг./м<sup>3</sup>;  $B2$  — концентрация органического углерода в воде водохранилища, кг С орг./м<sup>3</sup>; 25 — коэффициент глобального потепления для пересчета метана в единицы  $\text{CO}_2$ -экв.

При этом переменная  $\Delta B1-A1$ , которая рассчитывается как разница значений эмиссии метана с поверхности реки (неуправляемая экосистема) и поверхности водохранилища, показывает антропогенный эффект на величину эмиссии метана в атмосферу от привнесенного органического вещества (с отдельным учётом автохтонного органического вещества).

Расчёт переменной  $B1$  (см. рис. 1) выполнялся по данным измерений потоков метана за 2021–2023 гг. и численного моделирования по LAKE3.0, при этом результаты измерительных кампаний использовались для калибровки модели. Далее по модели восстанавливался годовой ход потока метана в среднем по водоему, из которого получался удельный поток метана (67.9 мг  $\text{CH}_4$ /м<sup>2</sup>/сут). Вегетационный период на Рыбинском водохранилище составляет 198 суток, поэтому пересчёт производился с учётом длительности этого периода. Эмиссия метана в атмосферу на реке (переменная  $A1$ ) и содержание общего органического углерода (переменная  $A2$ ) вычислялась по данным измерений.

Для расчёта переменной  $B2$  использовался показатель содержания растворенного углерода в воде Рыбинского водохранилища, полученный по данным измерений, осредненным по всем сезонам и станциям.

Переменная  $C1$  рассчитана как соотношение концентрации органического углерода в воде реки и в воде водохранилища, условно принимая, что концентрация органического углерода в реке соответствует доле аллохтонного веще-

ства водохранилища. Таким образом, на основе рассчитанных ранее величин  $A2$  и  $B2$ , концентрация органического углерода в реке составила 0.008 кг/м<sup>3</sup>, а в воде водохранилища — 0.013 кг/м<sup>3</sup>, что дает соотношение 60% аллохтонного органического углерода ( $C1$ ) и 40% — автохтонного ( $C2$ ).

Антропогенное изменение осаждения  $S_{anthrop}$  в водохранилище по сравнению с рекой рассчитывается по формулам (11–13):

$$S_{anthrop} = (S_{new} + S_{res}) \cdot \mu_{\text{CO}_2} / \mu_C, \quad (11)$$

$$S_{new} = C1 \cdot (B3 - A3), \quad (12)$$

$$S_{res} = C2 \cdot B3, \quad (13)$$

где  $S_{new}$  — осаждение от аллохтонного вещества в новых условиях, кг  $\text{CO}_2$ -экв./м<sup>2</sup>/год;  $S_{res}$  — осаждение от автохтонного вещества в водохранилище, кг  $\text{CO}_2$ -экв./м<sup>2</sup>/год;  $A3$  — осаждение органического вещества в реке, кг С- $\text{CO}_2$ /м<sup>2</sup>/год;  $B3$  — осаждение органического вещества в водохранилище, кг С- $\text{CO}_2$ /м<sup>2</sup>/год;  $\mu_{\text{CO}_2}$  и  $\mu_C$  — молярные массы  $\text{CO}_2$  и атома углерода, множитель  $\mu_{\text{CO}_2} / \mu_C$  служит для перевода массы углерода в  $\text{CO}_2$ -эквивалент.

Переменная  $\Delta B3-A3$ , которая рассчитывается как разница между осаждением в реке (неуправляемая экосистема) и водохранилищем (с отдельным учетом автохтонного органического вещества), показывает антропогенный эффект на величину осаждения углерода из привнесенного органического вещества.

Переменная  $A3$  была получена на основе данных моделирования через отношение рассчитанного общего углерода, принесенного с водосбора к осаждаемому с учетом данных исследования [Иванов и Чалов, 2023].

Антропогенное изменения содержания органического углерода  $C_{опз\_антроп}$  в воде водохранилища рассчитывается по формуле (14):

$$C_{опз\_антроп} = (B2 \cdot h_g - A2 \cdot h_p) \times \\ \times 1/t \cdot 10000 \cdot \mu_{\text{CO}_2} / \mu_C, \quad (14)$$

где  $h_p$  — средняя глубина реки, м;  $h_g$  — средняя глубина водохранилища, м;  $t$  — период заполнения водохранилища, год.

Как и в предыдущих разделах, для пересчета метана в единицы  $\text{CO}_2$ -экв. использовался пересчетный коэффициент глобального потепления, равный 25 [IPCC, 2007].

Средняя глубина реки Волга до Рыбинского водохранилища составляет 5.5 м по данным сети гидропостов Росгидромета (<https://allrivers.info/gauge/volga-myshkin>). Заполнение этого водохранилища продолжалось 6 лет [Рыбинское водохранилище..., 1972]. Удельный показатель эмиссии метана в воде водохранилища рассчитывался через среднюю глубину Рыбинского водохранилища 5.6 м, определенного по данным [Отчет, 2021].

Таким образом, по результатам трехлетнего ряда измерений были проведены оценки национальных коэффициентов эмиссии с территории каждого изученного водохранилища по Уровням 1 и 2, выполнено сопоставление полученных результатов с коэффициентами эмиссии метана, представленных в методике МГЭИК по умолчанию [IPCC, 2019]. Также в данной работе выполнена оценка баланса эмиссии и поглощения парниковых газов водными объектами по данным измерений, полученных на Рыбинском водохранилище. За основу взята разработанная авторами методология оценки баланса углерода экосистемы водохранилища и оценки антропогенного воздействия на интенсивность потоков углерода и эмиссии метана в данной экосистеме, соответствующая Уровню 3 МГЭИК.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Оценка коэффициентов эмиссии парниковых газов в соответствии с рекомендациями МГЭИК*

##### Уровень 1

Данные измерений потоков метана на водохранилищах приведены в табл. 2. Разработанные в работе уточненные коэффициенты получены расчетным путем с использованием данных измерений по каждому водохранилищу за 2021–2023 гг.

Коэффициенты МГЭИК по умолчанию применяются на 1 Уровне расчетов и не могут учитывать конкретные особенности водохранилищ, так как по сути являются усредненными значениями для крупных и малых искусственных водоемов. В нашей работе получены данные только для крупнейших и крупных водохранилищ, которые имеют большую глубину и площадь зеркала воды, что приводит к меньшим значениям эмиссии с поверхности воды. Усреднение показателей в глобальном масштабе может привести к неточностям оценок эмиссии и поглощения парниковых газов как на отдельно взятых водоемах, так и

в целом по стране. Такие коэффициенты выбросов не учитывают национальные особенности, а также конкретные свойства отдельных водохранилищ, которые могут включать:

1. функционирование водохранилища;
2. его размер и глубину;
3. относительное расположение кислородных / бескислородных водозаборов;
4. трофический статус;
5. осаждение и улавливание углерода, и другие факторы окружающей среды (например, сезонный ледяной покров);
6. факторы управления водоспуском.

В табл. 5 приведено сопоставление рассчитанных нами на основании трехлетних рядов измерений и данных моделирования коэффициентов эмиссии метана с поверхности исследуемых водохранилищ по Уровню 1 с коэффициентами, представленными МГЭИК [IPCC, 2019].

Полученный национальный средний коэффициент для бореальной зоны сопоставим с коэффициентами по умолчанию МГЭИК [IPCC, 2019]. Коэффициент для прохладной умеренной влажной зоны на 38% меньше, чем коэффициент по умолчанию. Коэффициент, полученный для теплой умеренной зоны, основан на измерениях только по одному водохранилищу – Чиркейскому, которое является высокогорным, и не может быть использован на данном этапе исследований, так как данное водохранилище не является репрезентативным для всей климатической зоны.

Нами также было выполнено два варианта оценок общей эмиссии  $\text{CH}_4$  с поверхности исследуемых водохранилищ по Уровню 1:

1. С использованием национальных коэффициентов эмиссии, разработанных в результате работ по настоящей НИР;
2. С использованием коэффициентов эмиссии по умолчанию, представленных в методике МГЭИК [IPCC, 2019].

Результаты расчетов по Уровню 1 представлены на рис. 2. В среднем эмиссия метана с поверхности российских водохранилищ при использовании коэффициентов МГЭИК по умолчанию на 63% превышает эмиссию метана при оценке с использованием национальных коэффициентов. Наиболее сопоставимые оценки эмиссии метана

**Таблица 5.** Сопоставление уточненных коэффициентов эмиссии метана с поверхности водохранилищ с коэффициентами по умолчанию МГЭИК, 2019

Название водохранилища	Климатическая зона по МГЭИК	Уточненный коэффициент (настоящее исследование), кг CH <sub>4</sub> /га	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения уточненного коэффициента	Коэффициент МГЭИК (2019) кг CH <sub>4</sub> /га	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения коэффициента по умолчанию МГЭИК
Колымское	Бореальный влажный	1.5	0.6–4.2	13.6	7.3–19.9
Бурейское	Бореальный влажный	11.5	5.8–26.5	13.6	7.3–19.9
Волгоградское	Прохладный умеренный влажный	20.1	15.4–43.5	54.0	48.3–59.5
Богучанское	Бореальный влажный	2.5	1.0–3.6	27.7*	20.8–34.7
Зейское	Бореальный влажный	3.4	2.1–6.3	13.6	7.3–19.9
Куйбышевское	Прохладный умеренный влажный	30.5	16.5–36.9	54.0	48.3–59.5
Рыбинское	Прохладный умеренный влажный	48.9	44.1–71.1	54.0	48.3–59.5
Чиркейское	Теплый умеренный / сухой	9.4	6.8–21.5	150.9	133.3–168.1
Саяно-Шушенское	Бореальный влажный	5.9	4.3–7.9	13.6	7.3–19.9
Среднее для бореальной зоны		5.6	1.3–9.9	13.6	7.3–19.9
Среднее для теплой умеренной сухой зоны		9.4**	5.1–11.7	150.9	133.3–168.1
Среднее для прохладной умеренной влажной зоны		33.2	16.4–50.0	54.0	48.3–59.5

\* для водохранилищ моложе 20 лет.

\*\* по данным только одного водохранилища.

с поверхности воды отмечаются на Бурейском и Саяно-Шушенском водохранилищах (разница 15% и 16%, соответственно).

### Уровень 2

Сопоставление оценок эмиссии метана с поверхности водохранилищ по Уровню 2 согласно МГЭИК [IPCC, 2019] с использованием коэффициентов по умолчанию и уточненных коэффициентов для каждого водохранили-

ща представлены в табл. 6. При этом вычтены эмиссии с площади рек до затопления, а также учитывалась высота забора воды из водохранилища. По аналогии с оценками, полученными по Уровню 1, выбросы метана с поверхности большинства изученных водохранилищ оказались значительно ниже при использовании разработанных коэффициентов по сравнению с коэффициентами МГЭИК. Использование подходов по оценке вклада деятельности чело-



Рис. 2. Сопоставление результатов оценки эмиссии метана с поверхности водохранилищ по Уровню 1 МГЭИК

Таблица 6. Результаты оценки по Уровню 2 МГЭИК эмиссии метана с поверхности водохранилищ с вычетом естественной эмиссии от площади реки до затопления

Наименование	Естественная эмиссия $\text{CH}_4$ (на площади реки до затопления) с затопляемых земель с использованием национальных коэффициентов, тонн $\text{CH}_4$ / год	Естественная эмиссия $\text{CH}_4$ (на площади реки до затопления) с затопляемых земель с использованием коэффициентов МГЭИК 2019 по умолчанию, тонн $\text{CH}_4$ / год	Суммарный выброс $\text{CH}_4$ от водохранилищ, с использованием национальных коэффициентов за вычетом естественной эмиссии, тонн $\text{CH}_4$ / год	Суммарный выброс $\text{CH}_4$ от водохранилищ, с использованием коэффициентов МГЭИК 2019 по умолчанию за вычетом естественной эмиссии, тонн $\text{CH}_4$ / год	Разница между расчетом по коэффициентам МГЭИК и национальным коэффициентам, тонн $\text{CH}_4$ / год	Разница между расчетом по коэффициентам МГЭИК и национальным коэффициентам, %
Колымское	5	44	67	609	543	89
Бурейское	127	150	801	947	146	15
Волгоградское	718	5387	6119	45882	39763	87
Богучанское	207	2305	424	4718	4294	91
Зейское	42	169	848	3417	2569	75
Куйбышевское	4304	11322	16160	42507	26347	62
Рыбинское	1609	2642	22646	37183	14537	39
Чиркейское	11	181	32	516	484	94
Саяно-Шушенское	45	102	711	799	88	11

века в общие выбросы от водохранилищ позволяет существенно уточнить оценки и сокращает величину общих выбросов  $\text{CH}_4$  за счет исключения естественных «площадных» эмиссий (табл. 6).

*Оценка нетто-выбросов парниковых газов на основе балансового метода (Уровень 3)*

На основании исходных данных, представленных в табл. 7, была выполнена оценка нетто-потоков парниковых газов водохранилища по данным измерений и моделирования на основе разработанной методологии оценки баланса углерода экосистемы водохранилища и вычленения эффекта антропогенного воздействия на интенсивность потоков углерода и эмиссии метана в этой экосистеме на примере Рыбинского водохранилища.

На основе результатов экспериментальных измерений и моделирования удалось оценить

полный нетто-баланс парниковых газов в водохранилище и реке. Результаты приведены на рисунке 3. В результате проведенных нами расчетов по Уровню 3 был составлен баланс в расчете на чистый углерод и оценены потоки парниковых газов в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте для возможности сопоставления восходящего потока в атмосферу (метана) и нисходящего (осаждения) (см. рис. 3).

Как следует из рис. 3, абсолютная эмиссия с поверхности воды при строительстве водохранилища увеличивается с 0.05 до 0.34 кг  $\text{CO}_2$ -экв/м<sup>2</sup>/год. При этом осаждение органического вещества растет при строительстве водохранилища с 0.27 до 0.62 кг  $\text{CO}_2$ -экв/м<sup>2</sup>/год. Сопоставление восходящего (эмиссии в атмосферу) и нисходящего (осаждение) потоков показывает, что Рыбинское водохранилище, как и река Волга, являются нетто-поглотителем парниковых газов, при этом, объем поглощения водохранилищем выше, чем рекой (рис. 3).

**Таблица 7.** Исходные данные для расчёта по Уровню 3 (данные измерений и моделирования)

Переменная	Значение по данным моделирования, размерность	Рассчитанные значения потоков углерода на единицу площади	Стандартное отклонение, %
A1 Эмиссия метана с поверхности р. Волга	0.002 кг $\text{CH}_4$ /м <sup>2</sup> /год	0.0015 C- $\text{CH}_4$ кг/м <sup>2</sup> /год	±66
A2 Содержание органического углерода в воде р. Волга	0.008 кг С орг/м <sup>3</sup>	0.04 кг Сорг/м <sup>2</sup> /год	±30
A3 Седиментация органического вещества на р. Волга	0.07 C- $\text{CO}_2$ кг/м <sup>2</sup> /год	0.07 C- $\text{CO}_2$ кг/м <sup>2</sup> /год	±88
B1 Эмиссия метана с поверхности Рыбинского водохранилища	67.9 мг $\text{CH}_4$ /м <sup>2</sup> /сут	0.013 C- $\text{CH}_4$ кг/м <sup>2</sup> /год	±44
B2 Содержание органического углерода в воде Рыбинского водохранилища	0.013 кг С орг/м <sup>3</sup>	0.07 кг Сорг/м <sup>2</sup> /год	±30
B3 Седиментация органического вещества в Рыбинском водохранилище	0.17 кг C- $\text{CO}_2$ /м <sup>2</sup> /год	0.17 кг C- $\text{CO}_2$ /м <sup>2</sup> /год	±39
C2 – доля автохтонного органического вещества в воде водохранилища	—	0.40	—

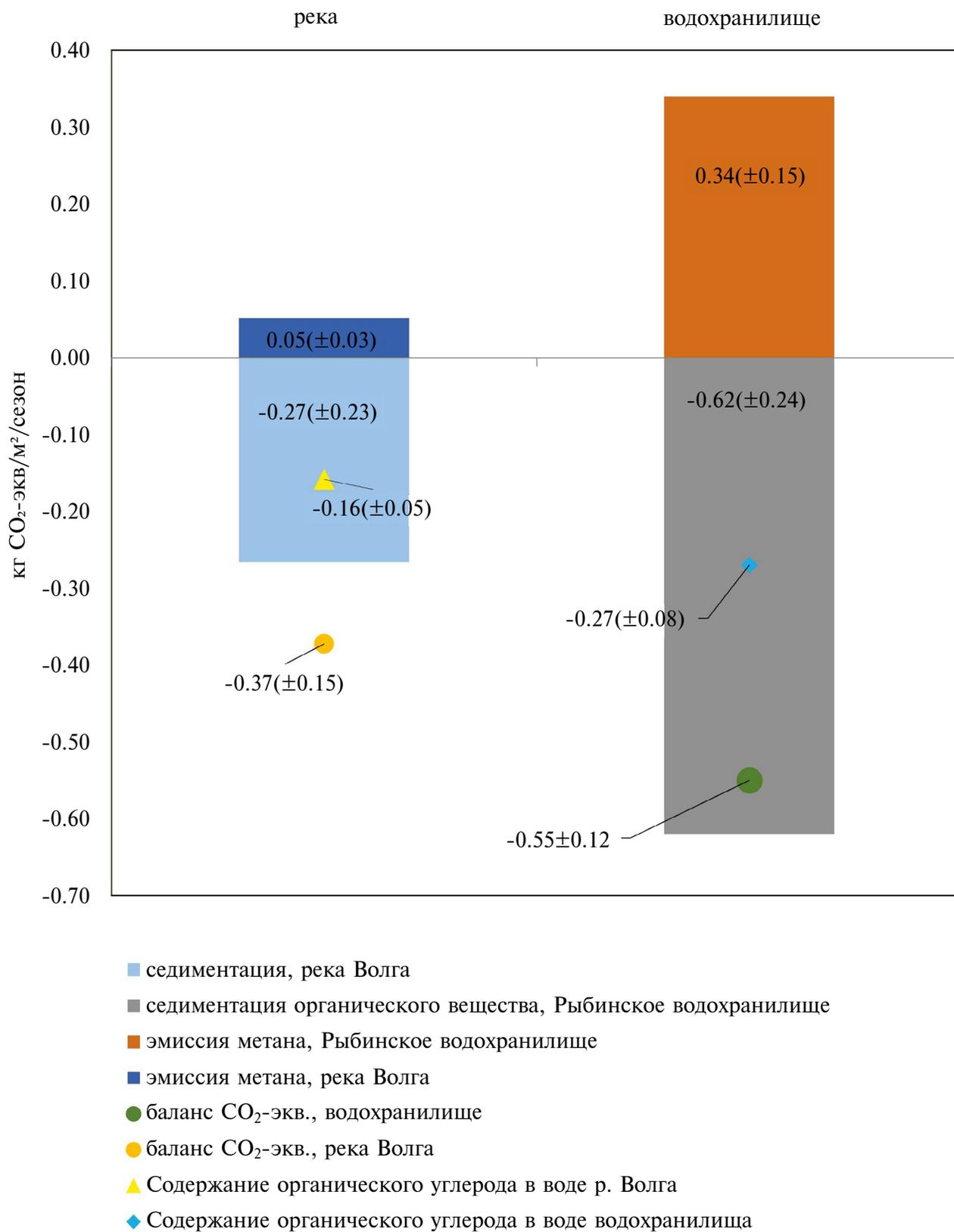


Рис. 3. Баланс потоков парниковых газов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на Рыбинском водохранилище и реке Волга (положительные значения характеризуют эмиссию, отрицательные – поглощение)

Показатель содержания общего органического углерода в воде Рыбинского водохранилища определялся по данным измерений и составил  $0.013 \pm 0.004$  кг Сорг/м<sup>3</sup>. Показатель содержания общего органического углерода в реке составил  $0.008 \pm 0.002$  кг Сорг/м<sup>3</sup> что в 1.7 раз ниже, чем в водохранилище, хотя широкие диапазоны разброса данных вокруг средних величин не позволяют установить статистическую значимость этого результата (см. табл. 7). Разница может быть обусловлена, вероятно, тем, что в реках органическое вещество находится в движении и выносится вниз по течению, тогда как сооружение дамб и плотин препятствуют дальнейшему выносу органики и способствуют её накоплению в самом водохранилище. Накопление автохтонного органического вещества происходит также за счет развития собственной биоты на территории водохранилища [Ciesla et al, 2022].

Выполненные расчеты по формулам (7)–(14) с использованием как измеренных данных, так и модельных оценок, позволили оценить антропогенный вклад в нетто-баланс парниковых газов в результате устройства водохранилища и его составляющие (отрицательные величины показывают сокращение данного потока с м<sup>2</sup> в водохранилище по сравнению с рекой, положительные – его увеличение):

$$E_{\text{anthrop}} = 0.31 \pm 0.13 \text{ кг CO}_2\text{-экв./м}^2\text{/год};$$

$$C_{\text{opr\_anthrop}} = 0.02 \pm 0.016 \text{ кг CO}_2\text{-экв./м}^2\text{/год};$$

$$S_{\text{anthrop}} = 0.46 \pm 0.24 \text{ кг CO}_2\text{-экв./м}^2\text{/год}.$$

Общая величина  $F_{\text{anthrop}}$  отрицательная и соответствует  $-0.18 \pm 0.28$  кг CO<sub>2</sub>-экв./м<sup>2</sup>/год. Таким образом нами получен вывод о том, что с высокой вероятностью антропогенное воздействие на речную экосистему привело к нетто-поглощению парниковых газов при устройстве водохранилища, что, в свою очередь, свидетельствует о возможности отрицательного углеродного следа электроэнергии с данной ГЭС. При этом отмечаем необходимость продолжения натуральных измерений и совершенствования модельных оценок для накопления более делительных и надёжных данных по потокам углерода и парниковых газов в экосистемах рек и энергетических водохранилищ, которые позволят снизить неопределенности полученных оценок.

Таким образом, по разнице между неуправляемой и управляемой экосистемой были получены следующие результаты:

- эмиссия метана с поверхности водохранилища в абсолютном выражении была на  $0.009 \pm 0.0046$  кг C-CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/год (уровень значимости по t-критерию Стьюдента  $p = 0.077$ ) или в 6.5 раз выше, чем с поверхности реки (Δ Б1-А1);
- осаждение органического вещества в водохранилище на  $0.1 \pm 0.009$  кг C-CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/год ( $p = 0.304$ ) или в 2.3 раза выше, чем в реке;
- содержание органического и взвешенного углерода в воде водохранилища на  $0.0053 \pm 0.0047$  кг Сорг/м<sup>3</sup> ( $p = 0.827$ ) или в 1.7 раз выше, чем в реке (Δ Б2-А2).

В целом, оценки, полученные в нашей работе, хорошо согласуются с данными разных авторов. Наиболее изученным показателем является эмиссия метана в атмосферу от поверхности воды, т.к. известно, что водохранилища являются источником дополнительной эмиссии метана [Tremblay et al., 2005]. Несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с их поверхности, проблема достоверной оценки остается актуальной, поскольку эти оценки основаны на ограниченном числе данных и имеют довольно большой разброс. Так, в работе [Varis et al., 2012] в умеренно-холодной (бореальной) зоне среднее значение эмиссии углекислого газа по исследованной группе водохранилищ составляет 1890 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут и 17 мг CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут (62 кг CH<sub>4</sub>/га/год), а для умеренной зоны средняя оценка – 550 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут и 9 мг CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут (или 33 кг CH<sub>4</sub>/га/год). В работе [Deemer et al., 2016] для водохранилищ энергетического назначения даётся оценка потоков парниковых газов 32–149 мг CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут (или 117–544 кг CH<sub>4</sub>/га/год). В работе [Varros et al, 2011] среднее значение эмиссий углекислого газа и метана для водных объектов высоких широт (30–68° с.ш.) оценивалось в 1203 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут и 55 мг CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут (или 55 кг CH<sub>4</sub>/га/год), соответственно.

Содержание общего органического углерода в реках имеет не менее значительный разброс значений. Так, в работе [Niemiryucz et al., 2006] приведена оценка содержания общего органического углерода от 3.7 до 29.0 г/м<sup>3</sup> в воде р. Одра. В работах [Niemiryucz, 1985–2001] оценка варьировалась от 5.7 до 21.1 г/м<sup>3</sup> для рек, протекающих по тер-

ритории Польши. В работе [Thurman, 1986] приводились оценки для ряда рек Европы, которые варьировались от 5.7 до 8.5 г/м<sup>3</sup>. Для российских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, приводилась оценка в 3.1–13.9 г/м<sup>3</sup> согласно работе [Lobbes et al., 2000]. В работе [Рижинашвили, 2008] также приводятся оценки содержания общего органического вещества в водах рек Валдайка (4.72 г/м<sup>3</sup>), Малая Истра (4.72 г/м<sup>3</sup>), Ока (5.23 г/м<sup>3</sup>) и Самара (5.58 г/м<sup>3</sup>). Значение содержания органического вещества в воде реки Волга равно 6.4 г/м<sup>3</sup> согласно работе [Рижинашвили, 2008], хорошо коррелирует с оценками, полученными в нашей работе (8 г/м<sup>3</sup>), и результатами других авторов для рек умеренной и бореальной зоны.

Эмиссия метана с поверхности неуправляемых водных экосистем может варьировать в зависимости от их широтного и зонального положения. Так, в работе [Bastviken et al., 2011] годовая эмиссия CH<sub>4</sub> с поверхности рек составляет 5.1 г/м<sup>2</sup> для широт < 24°, 4.8 г/м<sup>2</sup> для широт 25°–54°, 2.5 г/м<sup>2</sup> для широт > 54°–66° и 2.6 г/м<sup>2</sup> для широт > 66°. В работе [Campeau et al., 2014] оценки потоков метана с поверхности рек, протекающих в бореальной зоне (Канада), варьируют от 1.3 до 40.9 г/м<sup>2</sup>. В работе [Bussmann et al., 2022] эмиссия метана с поверхности реки умеренной зоны составила 1.4 г/м<sup>2</sup>, хотя оценка эмиссии метана в работе [Matoušů et al., 2019] для той же реки составила 0.9 г/м<sup>2</sup>. Значение эмиссии метана для реки Волга в окрестности изученных водохранилищ, использованное в нашей работе, составляет около 2 г/м<sup>2</sup> в год.

Данные по оценке антропогенного вклада в баланс парниковых газов водохранилищ в литературе нами не обнаружены.

Как показал анализ национальных кадастров развитых стран, методология МГЭИК 2019 г. пока не применяется в их ежегодной отчетности. По нашему мнению, это косвенно свидетельствует о недостаточной надежности методики по умолчанию. Так, Канада представляет оценки только по CO<sub>2</sub>, не указывая эмиссию метана [National Inventory..., 2022]. Финляндия отчитывается только по эмиссиям парниковых газов при переводе земель в водно-болотные угодья [Greenhouse gas..., 2022], а США и Германия совсем не включают эту категорию в отчетность [EPA, 2022; Submission..., 2022]. Именно поэтому результаты масштабной работы по исследованию

9 крупнейших водохранилищ России и разработка корректной методики оценки антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов от затопленных земель являются передовым достижением не только в национальном, но и мировом масштабе.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки коэффициентов антропогенных выбросов парниковых газов на основе данных натурных наблюдений и моделирования на девяти водохранилищах Российской Федерации, расположенных в различных природно-климатических условиях, выполнены в соответствии с методикой и рекомендациями МГЭИК по трем уровням сложности. Согласно МГЭИК для водохранилищ старше 20 лет поток углекислого газа считается сбалансированным, поэтому в результирующих оценках принимается во внимание только эмиссия метана. Осреднённые коэффициенты эмиссии метана с поверхности исследуемых водохранилищ составили 5.6 (±4.3) кг CH<sub>4</sub>/га/год для бореальной зоны и 33.2 (±16.8) кг CH<sub>4</sub>/га/год для прохладной умеренной влажной зоны. Коэффициенты были рассчитаны на год с учетом продолжительности безледного периода. Полученный в данной работе коэффициент эмиссии для бореальной зоны близок к диапазону коэффициента по умолчанию МГЭИК (13.6±6.3 кг CH<sub>4</sub>/га), коэффициент эмиссии для прохладной умеренной влажной зоны ниже коэффициента по умолчанию (54.0±5.5) в 1.6 раз.

По результатам анализа полученных значений эмиссии метана с поверхности водохранилищ по 1 и 2 Уровням следует, что национальные коэффициенты оказываются в среднем на 63% ниже оценок эмиссии метана с поверхности водохранилищ, рассчитанных по методологии МГЭИК. Национальные коэффициенты эмиссии, в отличие от коэффициентов МГЭИК 2019, учитывают территориально-географические особенности страны, а также конкретные свойства отдельных водохранилищ, например, особенности функционирования водохранилищ, размеры и глубины, относительное расположение кислородных/бескислородных водозаборов, их трофический статус, осаднение и улавливание углерода, и другие факторы окружающей среды (например, сезонный ледяной покров), что позволяет дать более точные оценки.

По результатам балансовой оценки эмиссий и поглощений парниковых газов (коэффициенты 3 Уровня по МГЭИК) согласно данным измерений и математического моделирования, антропогенная составляющая баланса потоков парниковых газов Рыбинского водохранилища оценена в  $-0.18 \pm 0.28$  кг  $\text{CO}_2$ -экв/ $\text{м}^2$ /год, что свидетельствует, что антропогенное воздействие на речную экосистему с высокой вероятностью привело к нетто-поглощению парниковых газов при заполнении водохранилища.

Если полученные результаты будут подтверждены на других исследованных энергетических водохранилищах, можно будет подтвердить вывод об антропогенном нетто-поглощении парниковых газов на водохранилищах бореальной и/или умеренной зон России. Это, в свою очередь, свидетельствует о возможности отрицательного углеродного следа электроэнергии крупных ГЭС.

Оценки, приведённые в данной работе, носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований по накоплению длительных рядов данных и повышения надежности математического моделирования, для подтверждения нетто-поглощения парниковых газов крупными искусственными водными экосистемами. Для уточнения оценок антропогенных потоков парниковых газов на водохранилищах необходимо продолжить измерения годовых потоков парниковых газов как до строительства плотины (на участке реки до начала водохранилища), так и на самих водохранилищах, а также после плотины ниже по течению реки. Для корректного учета межгодовой изменчивости необходимо уточнить такие параметры за период не менее 10 лет, как:

- эмиссия метана в единицах углерода с площади поверхности в среднем за год по всем изученным водохранилищам;
- содержания органического углерода в единице объема воды и динамики этого показателя;
- скорость осаждения органического углерода на единицу площади в год в водохранилищах и в реках, впадающих в них.

Это позволит более точно вычленить антропогенное воздействие на изменение потоков парниковых газов в категории МГЭИК «Затопленные земли, остающиеся затопленными землями».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Законнов В.В.* Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Волги // Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ. Труды ИБВВ РАН. 1993. Вып. 66(69). С. 3–16.
- Законнов В.В.* Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. Автореферат дисс. ... доктора географических наук. Москва: Институт географии РАН, 2007. 52 с.
- Законнов В.В., Литвинов А.С., Законнова А.С.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 2. Результаты мониторинга донных отложений и последствия понижения уровня Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России. 2015. № 4. С. 21–35.
- Иванов В.А., Чалов С.Р.* Соотношение компонентов баланса наносов для больших рек: эрозия и аккумуляция, русловая и водосборная эрозия. Почвенные и земельные ресурсы: традиционные и инновационные подходы к изучению и управлению // Материалы международной научно-практической конференции. 2023. С. 69–72.
- Карнаухова Г.А.* Процессы осадкообразования в водохранилищах ангарского каскада. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2009. 63 с.
- МГЭИК (2006). Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 года. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Под ред. Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. Танабе К. Япония: ИГЕС.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов», этап 1, Москва, 2021. 242 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов», этап 3, Москва, 2024. 211 с.
- Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л., Казанцев В.С., Шестеркин В.П.* Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718.

- Рижинашвили А.Л.* Показатели содержания органических веществ и компоненты карбонатной системы в природных водах в условиях интенсивного антропогенного воздействия // Вестник СПбГУ. 2008. сер.4. Физика, химия. № 4. С. 90–101.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л: Наука, 1972. 364 с.
- Степаненко В.М., Гречушникова М.Г., Ренина И.А.* Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 76–99.
- Barros N., Cole J., Tranvik L. et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nature Geosci.* 4. 2011. P. 593–596.
- Bastviken D., Nygren J., Schenk J., Parellada Massana R., Duc N. T.* Technical note: Facilitating the use of low-cost methane (CH<sub>4</sub>) sensors in flux chambers – calibration, data processing, and an open-source make-it-yourself logger // *Biogeosciences.* 17. 2020. P. 3659–3667.
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A.* Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink // USA: *Science.* 2011. V. 331. P. 6013–6063.
- Berga L.* The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review // *Engineering.* V. 2. Issue 3. 2016. P. 313–318.
- Bretz K.A., Jackson A.R., Rahman S., Monroe J.M., Hotchkiss E.R.* Integrating ecosystem patch contributions to stream corridor carbon dioxide and methane fluxes // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021. V. 126. P. 1–17.
- Bussmann I., Koedel U., Schütze C., Kamjunke N., Koschorreck M.* Spatial Variability and Hotspots of Methane Concentrations in a Large Temperate River // *Front. Environ. Sci.* 2022. V. 10. P. 1–14.
- Campeau A., Lapierre J.-F., Vachon D., del Giorgio P.A.* Regional contribution of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from the fluvial network in a lowland boreal landscape of Québec // *Global Biogeochem. Cycles.* 2014. V. 28. P. 57–69.
- Ciesla M., Gruca-Rokosz R., Bartoszek L.* Significance of organic matter in the process of aggregation of suspended sediments in retention reservoirs // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 815. P. 1–11.
- Clark J.A., Jafarov E.E., Tape K.D. et al.* Thermal modeling of three lakes within the continuous permafrost zone in Alaska using the lake 2.0 model // *Geoscientific Model Development.* 2022. V. 15. P. 7421–7448.
- Crawford J.T., Loken L.C., West W.E., Crary B., Spawn S.A., Gubbin N., Jones S.E., Striegl R.G., Stanley E.H.* Spatial heterogeneity of within-stream methane concentrations // *J. Geophys. Res.-Biogeosci.* 2017. V. 122. 1036–1048.
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro T., Barros N. et al.* Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis // *BioScience.* 2016. V. 66(11). P. 949–964.
- EPA Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-R-22-003. 2022. <https://www.epa.gov/ghgemissions/draft-inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020>.
- Fearnside P.* Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Reply to Rosa et al. // *Clim. Change.* 2006. № 75. P. 103–109.
- Fearnside P.M.* Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of greenhouse gases // *Environ. Conserv.* 1995. № 22. P. 7–19.
- Giles J.* Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature.* 2006.V. 444. P. 524–525.
- Goldenfum J.A.* GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. London: The International Hydropower Association (IHA), 2010. 138 p.
- Golub M., Thiery W., Marcé R. et al.* A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the isimip lake sector // *Geoscientific Model Development.* 2022. V. 15. P. 4597–4623.
- Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2020. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 2022. 535 p.
- Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M.* Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series. New York: Springer, 2005. 732 p.
- Ion I.V., Ene A.* Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs // A Review. *Sustainability.* 2021. V. 13. P. 1–16.
- IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). IPCC: Switzerland, 2019.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds.). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 996 p.
- IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation / Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P.,

- Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., C. von Stechow (eds.) / Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2011. 246 p.
- IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. and Zhou B. (eds.). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2021. 2391 p.
- Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. V. 126. P. 1–19.
- Kougiass I. Hydropower Technology Development Report 2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. 44 p.
- Levasseur A., Mercier-Blais S., Prairie Y.T., Tremblay A., Turpin C. Improving the accuracy of electricity carbon footprint: Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. V. 136. P. 1–15.
- Lobbes J.M., Fitznar H. P., Kattne G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. V. 64. № 17. P. 2973–2983.
- Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir // *Water*. 2024. V. 16. № 1. P. 76.
- Matoušů A., Rulík M., Tušer M., Bednařík A., Šimek K., Bussmann I. et al. Methane Dynamics in a Large River: a Case Study of the Elbe River // *Aquat. Sci.* 2019. V. 81 (1). P. 1–12.
- National Inventory Report 1990–2020: Canada's Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change. ECCC (Environment and Climate Change Canada): Quebec, 2022.
- Niemiryecz E. et al. Riverine input of pollutants. Environmental Conditions in the Polish Zone of the Southern Baltic Sea // *Maritime Branch Materials: Gdynia*. 1985–2000.
- Niemiryecz E., Gozdek J., Koszka-Marón D. Variability of Organic Carbon in Water and Sediments of the Odra River and Its Tributaries // *Polish Journal of Environmental Studies*. V. 15. № 4. 2006. P. 557–563.
- Robison A.L., Wollheim W.M., Turek B., Bova C., Snay C., Varner R.K. Spatial and temporal heterogeneity of methane ebullition in lowland headwater streams and the impact on sampling design // *Limnol. Oceanogr.* 2021. V. 66. P. 4063–4076.
- Rodríguez-García V.G., Palma-Gallardo L.O., Silva-Olmedo F., Thalasso F. A simple and low-cost open dynamic chamber for the versatile determination of methane emissions from aquatic surfaces // *Limnol Oceanogr Methods*. 2023. V. 21. P. 828–836.
- Rosa L.P., Dos santos M.A., Matvienko B., Dos Santos E.O., Sikar E. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions // *Clim. Change*. 2004. V. 66. P. 9–21.
- Stanley E.H., Loken L.C., Oliver S.K., Casson N.J., Sponseller R.A., Wallin M., Zhang L., Rocher-Ros G. GRiMeDB: the Global River Methane Database of concentrations and fluxes // *Earth Syst. Sci. Data*. 2023. V. 15. P. 2879–2926.
- Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. № 5. P. 1977–2006.
- Stepanenko V., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *J. of Adv. in Modelling Earth Sys.* 2020. V. 12. P. 21–63.
- Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2022. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990–2020. Federal Environment Agency, 2022.
- Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle, S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Weyhenmeyer G.A. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnology and Oceanography*. 2009. № 54 (6–2). P. 2298–2314.
- Zhao Yiyang, Suning Liu, Haiyun Shi. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. № 10. P. 1–13.

## ESTIMATION OF THE ANTHROPOGENIC COMPONENT OF GREENHOUSE GAS FLUXES FROM THE SURFACE OF ENERGY RESERVOIRS IN THE RUSSIAN FEDERATION

© 2025 A. A. Romanovskaya<sup>1,\*</sup>, P. D. Polumieva<sup>1</sup>, I. A. Repina<sup>2,3</sup>,  
A. A. Trunov<sup>1</sup>, V. M. Stepanenko<sup>3</sup>, V. A. Lomov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya str., 20B, Moscow, 107258 Russia*

<sup>2</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS,  
Pyzhevskiy per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Research Computing Centre, Leninskie gory, 1, bld. 4, Moscow, 119991 Russia*

\**e-mail: an\_roman@igce.ru*

The paper assesses anthropogenic emissions and absorptions of greenhouse gases from energy reservoirs in the Russian Federation based on the results of field measurements in 2021–2023. Measurements of methane fluxes from the surface of reservoirs were carried out by employees of the Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences in the shallow and deep-water parts of the basins of nine reservoirs (Kolymenskoye, Bureiskoye, Volgogradskoye, Boguchanskoye, Zeyskoye, Kuibyshevskoye, Rybinskoye, Chirkeyeskoye, Sayano-Shushenskoye). Based on these measurements and modeling data, we analyzed and compared the obtained results with the methane emission factors presented in the methodological documents of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). We have developed adjusted coefficients using Tiers 1 and 2 methods according to the IPCC. The results show that the revised national factors are on average 63% lower than the default IPCC factors. A methodology for assessing the anthropogenic component of the greenhouse gas balance due to reservoir construction using Tier 3 method has been developed based on carbon balance calculations and the difference between the parameters of the reservoir water and the river before it. Using the example of the Rybinsk Reservoir, we assessed the anthropogenic component of the greenhouse gas flow, corresponding to a net absorption of 0.18 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>/year. A conclusion has been made about the possibility of a negative carbon footprint of electricity from large hydroelectric power plants.

**Keywords:** reservoirs, greenhouse gases, methane, emissions, sources, absorption