

УДК 556.047

## ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ КОЛЫМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н.Л. Фролова<sup>1</sup>, А.А. Сазонов<sup>2</sup>, В.А. Ломов<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
кафедра гидрологии суши

<sup>2</sup> Институт водных проблем РАН

<sup>3</sup> Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова;  
Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, лаборатория парниковых газов

<sup>1</sup> Зав. кафедрой, д-р геогр. наук; e-mail: frolova\_nl@mail.ru

<sup>2</sup> Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

<sup>3</sup> Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: lomson620@mail.ru

На основе результатов натурных измерений концентрации метана в воде и его удельных потоков с водной поверхности впервые проведена оценка эмиссии метана в теплый период года из Колымского водохранилища, водосбор которого полностью находится в зоне вечной мерзлоты. Измерения удельного потока проводились методом плавучих камер, определение содержания метана в пробах – методом headspace [Goldenfum et al., 2010]. В качестве основного инструмента для численного воспроизведения удельных потоков метана из Колымского водохранилища была выбрана модель LAKE 3.2 [Lomov, Stepanenko et al., 2024]. В статье обобщены материалы сезонных наблюдений в сентябре 2021 г., апреле и августе 2022 г. и в августе 2023 г. Выявлена пространственная и сезонная изменчивость как содержания метана в воде, так и его эмиссии. Малое количество органического вещества в донных отложениях (для преобладающей части водохранилища не более 10%), невысокое содержание метана в толще воды (в среднем  $\text{CH}_4$  не более 4 мкл/л летом и 12 мкл/л зимой), небольшое содержание органического углерода в воде (4–5 мгС/л) способствует формированию низкого удельного потока (УП) метана с поверхности ( $1\text{--}3 \text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \times \text{сут})$ ). По результатам наблюдений эмиссия метана со всей поверхности водохранилища составила 0,4–0,5 т $\text{CH}_4$ /сут в летний период 2022–2023 гг. и 1,56 т $\text{CH}_4$ /сут в 2021 г.

С помощью модели удалось получить адекватное воспроизведение суточной эмиссии метана из Колымского водохранилища, которое соответствует данным, полученным в ходе проведенных полевых измерений УП метана из водохранилища. Расчеты по модели позволяют получить репрезентативную оценку эмиссии метана в исследованном водохранилище, которая учитывает изменчивость УП метана в течение года, что невозможно сделать по ограниченному числу проведенных полевых кампаний в труднодоступном для исследований Колымском водохранилище. Средняя годовая эмиссия метана из Колымского водохранилища за период с 2021 по 2023 г. составляет 958 т в год. Межгодовая изменчивость эмиссии метана весьма существенна, что объясняется динамикой температурного режима, который определяет скорость генерации метана в донных отложениях, а также различием в весеннем выбросе, который происходит в виде пузырьковой составляющей потока при вскрытии ледяного покрова в конце весны.

**Ключевые слова:** эмиссия парниковых газов, температура воды, экспедиционные исследования, моделирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.2

### ВВЕДЕНИЕ

Гидроэнергетика входит в перечень возобновляемых источников энергии [IPCC..., 2011]. 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; Giles, 2006]. Затопление наземных экосистем и измене-

ние гидрологического режима рек способствует росту эмиссии метана в атмосферу с поверхности водохранилищ [Ion, Ene, 2021]. При этом метан характеризуется в 25–29 раз большим парниковым воздействием, чем углекислый газ [IPCC..., 2021]. Согласно [IPCC..., 2021], вклад пресных водоемов в эмиссию метана в атмосферу составляет около 23% от всех источников.

Метан в водохранилище – это результат анаэробного разложения органического вещества в донных отложениях [Метан в водных экосистемах..., 2005]. Он может попадать в атмосферу в виде двух основных составляющих потока – диффузационного и пузырькового. Диффузационный поток имеет низкую скорость и зависит в основном от разницы концентраций метана в соседних водных горизонтах. Кроме того, значительная его часть может быть окислена в водной толще при попадании в слой, насыщенный кислородом. При таких условиях до 90% диффузационного потока может быть окислено метанотрофными микроорганизмами [Guerin, Abril, 2007]. Пузырьковый поток возникает при перенасыщении воды или порового раствора донных отложений метаном [Miller et al., 2017]. Он быстрее достигает поверхности воды и менее подвержен окислению. Окисление может происходить при растворении пузырьков в воде. Кроме того, на пузырьковый поток в значительной степени оказывает влияние давление – при резком изменении атмосферного или гидростатического давления (например, падение уровня воды в водохранилище при сбросах) пузырьковый поток может резко интенсифицироваться [Harrison et al., 2016]. Для искусствен-

ственных водоемов важной составляющей общей эмиссии также может выступать дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф.

Инвентаризация мировых данных по эмиссии метана с поверхности водохранилищ проведена большим коллективом авторов в 2016 г. [Deemer et al., 2016]. Использовались как данные об измерении потоков метана, так и оценки эмиссии по разным эмпирическим зависимостям. Авторы статьи собрали в единую базу данных результаты исследований эмиссии метана с поверхности 229 водохранилищ. Было показано, что значение эмиссии метана зависит от многих факторов: возраста водохранилища, проточности, сезона наблюдений, структуры донных отложений, типа поверхности водосбора, антропогенной нагрузки на территорию водосбора, доли пузырькового потока. Годовая эмиссия метана с водохранилищ мира по этим данным составляет 17,7 ТгСН<sub>4</sub>/год. Но в эту базу практически не входят водохранилища России.

В последних оценках, данных в работе [Rosentreter et al., 2021], рассматриваемая в работе [Deemer et al., 2016] база данных расширена, и эмиссия определяется с учетом размера водохранилищ и продолжительности ледостава (табл. 1).

Таблица 1  
Эмиссия метана по оценкам работы [Rosentreter et al., 2021]

Водохранилища	Глобальная эмиссия, ТгСН <sub>4</sub> /год		Удельный поток метана, мг/(м <sup>2</sup> ·сут)	
	Медиана	Среднее ( $\pm 1,95\%$ )	Медиана	Среднее ( $\pm 1,95\%$ )
<1 км <sup>2</sup>	0,4 (0,1–1,3)	2,4 $\pm$ 4,7	26,1	119,6 $\pm$ 116,5
>1 км <sup>2</sup>	14,7 (8,7–27,1)	22,0 $\pm$ 6,4	46,4	188,9 $\pm$ 105,6
Все	15,1 (8,8–28,4)	24,3 $\pm$ 8,0	36,2	174,7 $\pm$ 86,5

Для более точных оценок выбросов метана с определенного водохранилища необходимо проводить ряд полевых наблюдений в разные сезоны года с целью определения временной изменчивости содержания и эмиссии метана. Из нескольких тысяч созданных водохранилищ данные фактических натурных наблюдений имеются только по нескольким сотням [Rosentreter et al., 2021; Deemer et al., 2016]. Для оценки глобальной эмиссии применяются эмпирические закономерности, основанные на разных факторах, позволяющие лишь приблизительно оценить вклад водохранилищ в общую эмиссию метана. Наибольшее количество полевых наблюдений за концентрацией и эмиссией парниковых газов, в частности метана, накоплено для водоемов Канады, США, Бразилии, Китая.

В России исследования водохранилищ как источника парниковых газов начались еще в середи-

не прошлого века [Сорокин, 1960]. Среди работ российских исследователей необходимо отметить труды А.Н. Дзюбана [Дзюбан, 2012а, 2012б] по исследованию основных закономерностей цикла метана в донных отложениях разнотипных водоемов. Исследования, проводимые в Южном федеральном университете [Метан в водных экосистемах..., 2005; Fedorov et al., 2015, Гарькуша, Федоров, 2021], охватывают результаты отдельных экспедиций на водохранилищах юга России. По водохранилищам, находящимся в условиях вечной мерзлоты, такие исследования ранее не проводились не только в нашей стране, но и в мире.

В 2021 г. по заказу ПАО «РусГидро» был начат трехлетний цикл исследований по теме «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов» на девяти водохранилищах (Колымское, Бурейское,

Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское, Саяно-Шушенское) [Репина и др., 2022, 2023]. В данной статье будут подробно изложены результаты полевых измерений и математического моделирования эмиссии метана на Колымском водохранилище. Впервые проведенные на водоеме исследования позволяют получить соответствующие оценки для территории с вечной мерзлотой.

## МЕТОДЫ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидроузел в комплексе с основными гидротехническими сооружениями, образующими Колымское водохранилище, расположен в Ягоднинском городском округе Магаданской области на 1894-м км от устья р. Колымы у пос. Синегорье и в 217 км выше по течению реки от Усть-Среднеканской ГЭС.

Водохранилище было образовано путем строительства Колымской гидроэлектростанции имени Ю.И. Фриштера в 7 км выше по течению от пос. Синегорье Ягоднинского района. Данная гидроэлектростанция является основой энергетики Магаданской области, так как доля ее вклада в общую выработку электроэнергии составляет более 95%. Водосбор Колымского водохранилища полностью расположен в области сплошного распространения вечной мерзлоты. Колымское водохранилище является глубоким водоемом в силу орографии окружающей местности. Мощность Колымской ГЭС составляет 900 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии – 3325 млн кВт·ч. Колымское водохранилище образовано речным высоконапорным гидроузлом и относится к русловому долинному типу, его полезный объем позволяет осуществлять многолетнее регулирование стока.

Наполнение Колымского водохранилища началось 18 октября 1980 г. и проводилось в два этапа, по мере готовности основных сооружений гидроузла. Площадь водохранилища при НПУ равна 440,7 км<sup>2</sup>, полезная емкость – 6,51 км<sup>3</sup>, длина – 148 км, средняя ширина – 3 км, глубина водохранилища – до 120 м. Объем среднего многолетнего годового стока р. Колымы в створе гидроузла составляет 15,2 км<sup>3</sup> [Общая характеристика..., 2011; Колымское водохранилище..., 2024].

Основную роль в приходной части водного баланса Колымского водохранилища играет поверхностный приток и осадки на зеркало водохранилища – 15,24 км<sup>3</sup>. В расходной части сток через плотину и ГЭС составляет 15,075, потери на фильтрацию – 0,0947 км<sup>3</sup>, испарение – 0,071 км<sup>3</sup> [Об утверждении..., 2023]. Коэффициент водообмена равен примерно 1 год<sup>-1</sup>. Установление ледостава в приплотинной части водохранилища по данным ФГБУ «Колымское УГМС» наблюдается в первой

декаде – середине ноября, реже в конце ноября, окончание – в конце первой декады июня. Таким образом, продолжительность периода ледостава составляет 200–210 дней, периода свободного от льда – 130–150 дней [Общая характеристика..., 2011; Об утверждении..., 2023; Колымское водохранилище..., 2024; Лисина и др., 2024].

Современное использование Колымского водохранилища совпадает с его проектным назначением. Водохранилище используется для выработки электроэнергии, поддержания условий судоходства в нижнем бьефе гидроузла на участке р. Колымы от пос. Верхний Сеймчан до пос. Зырянка, а также для обеспечения питьевого и хозяйствственно-бытового водоснабжения. Помимо этого, Колымское водохранилище используется для рыбоводства и любительского рыболовства.

Для определения пространственно-временной изменчивости содержания и удельных потоков метана на водоемах в различные сезоны (в том числе во время ледостава) выполнялись съемки на опорных станциях. Выбор мест для отбора проб и измерений эмиссии метана был осуществлен с учетом ряда требований: по возможности измерения проводились на фарватере, над первоначальным руслом реки Колымы и над территорией затопленной поймы. Станции на фарватере необходимы для получения распределения по глубине определяемых параметров в самых глубоких местах водоема, станции на пойме, в свою очередь, отвечают наиболее характерным глубинам водохранилища. Районирование водохранилища проводилось с учетом влияния притоков и выделения наиболее однородных морфологических участков со схожим рельефом дна. Производились измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0,2°, 0,1 мг/л, 1 мкСм/см соответственно). Отбирались также пробы воды на содержание общего органического углерода. Кроме того, отбирались пробы в устьях основных притоков, впадающих в водохранилище. Число станций изменялось от семи в зимний период, когда толщина льда достигала 2 м и более, до 21 в летний период.

Существует несколько достаточно распространенных методов измерений удельных потоков метана с поверхности воды: метод плавучих камер, постановка станций Eddy Covariance, использование ДДЗЗ. В данном исследовании основным методом был выбран именно метод плавучих камер [Goldenfum et al., 2010], так как в случае экспедиционного обследования большого водного объекта именно он позволяет достаточно подробно охватить акваторию водоема и оценить пространственную изменчивость удельных потоков на большом коли-

честве станций натурных измерений. Суть метода заключается в постановке на поверхность воды герметичных пластиковых камер с поплавками (время экспозиции, как правило, не более 20 мин, площадь основания камер  $0,065\text{--}0,083\text{ м}^2$ , объем –  $0,006\text{--}0,009\text{ м}^3$ ). В склянки, заполненные насыщенным раствором  $\text{NaCl}$ , шприцом отбирается воздух из камеры в начале и в конце времени экспозиции. Значения удельного потока метана определялись по разности концентрации метана в камере в начале и в конце эксперимента. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом headspace [Goldenfum et al., 2010]. Пробы воды отбирались с поверхности, у дна, выше и ниже слоя температурного скачка при его наличии. Содержание метана в отобранных пробах определялось в Институте физики атмосферы РАН на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2 производства ЗАО «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола) в трехкратной повторности. Погрешности измерения удельных потоков и концентрации метана составляют 27 и 15% соответственно. Подробнее о получении величин относительных погрешностей данных характеристик можно найти в публикации [Lomov et al., 2024].

Отбор проб донных отложений производился дночерпателем Экмана-Бэрджа, анализировался верхний слой грунта толщиной не более 10 см. Определение содержания органического вещества в донных отложениях водохранилищ производилось методом потерь веса при прокаливании [ГОСТ 23740-2016, 2016]. На каждой станции измерялась скорость ветра, температура воздуха, атмосферное давление с использованием портативной метеостанции Kestrel.

На Колымском водохранилище проведены четыре экспедиции в разные сезоны года – 1–19 сентября 2021 г., 1–15 апреля 2022 г., 4–22 августа 2022 г., 7–25 августа 2023 г., всего было выполнено 386 измерений. Для калибровки модели использовались данные о термическом режиме водохранилища, полученные в 2020–2023 гг. во время ежедекадных съемок в приплотинном плесе и любезно предоставленные сотрудниками ФГБУ «Колымское УГМС».

В качестве основного инструмента для численного воспроизведения удельных потоков метана из Колымского водохранилища была выбрана модель LAKE 3.2 (автор В.М. Степаненко). Данная модель водоема представляет собой одномерную термодинамическую модель с включением блока биохимических расчетов. Подробное описание модели представлено в [Lomov et al., 2024], также более детальная информация о модели представлена на сайте [LAKE..., 2024]. Стоит отметить, что для моделирования водохранилищ полностью одно-

мерная стандартная конфигурация модели может не подходить, особенно для вытянутых долинных водохранилищ на подобии Колымского. Для учета при моделировании сложной морфометрии долинного водохранилища, донные отложения в модели были дифференцированы по глубине, всего в расчете было задано пять колонок донных отложений, примыкающих к водной толще на разных глубинах.

Несмотря на то что одномерная модель несет в себе некоторую степень неопределенности при расчете морфометрически сложного долинного водохранилища, применение одномерного подхода с распределенными по глубине колонками донных отложений остается наиболее оптимальным вариантом для воспроизведения временной изменчивости удельных потоков метана в атмосферу, полученных по результатам нескольких съемок.

Основные входные данные в модель LAKE – метеорологические параметры, а именно температура воздуха, влажность, давление, нисходящие потоки радиации, скорость приземного ветра и осадки. Данная информация была получена из реанализа ERA5-Land, который имеет высокое пространственно-временное разрешение:  $0,1^\circ$  координат и 1 час по времени. Предпочтение реанализу относительно данных наземных метеостанций отдано потому, что вблизи Колымского водохранилища отсутствуют метеорологические посты наблюдений, где есть измерения радиационного баланса земной поверхности. Для корректного воспроизведения водного баланса водоема на вход модели подавались данные о притоке и сбросе воды, а также об уровне водохранилища.

Период расчета модели составлял 3 года – 2021–2023 гг. Чтобы минимизировать влияние начальных условий на результаты моделирования, в расчете задавался разгонный период (spin up) длительностью 1 год. Начало разгонного периода – 01.01.2020. Начальный профиль температуры был задан равным  $4^\circ$  по всей глубине водоема, содержание кислорода задано в соответствии с его полным насыщением, концентрация метана в донных отложениях также задана равной полному насыщению, остальные биохимические параметры в начальный момент времени были приняты нулевыми. Так как при расчете использовался разгонный период, неточности при задании начальных условий нивелировались к моменту начала основного расчета, и модель приходила к равновесному состоянию. Шаг расчета модели – 1800 с, вертикальная сетка – 100 уровней со сгущением к поверхности и ко дну. Машинное время счета одного эксперимента с учетом разгонного периода составляло около 1 мин.

Основная задача использования в данной работе описанной выше модели LAKE – воспроизведение

временной изменчивости удельных потоков метана из водоема и оценка по этим данным величины годовой эмиссии метана. Проведенные полевые наблюдения дискретны и не могут в полной мере отразить сложную картину сезонной динамики его выбросов в атмосферу. Для получения корректных результатов в модели была проведена калибровка LAKE по натурным данным. Калибровка осуществлялась в три последовательных этапа – температурный режим, кислородный режим и удельные потоки метана в атмосферу. Такая последовательность была выбрана потому, что каждый этап калибровки является определяющим для последующего, но практически не зависит от предыдущих этапов. Так, кислородный режим водоема является ключевым фактором формирования диффузионного потока метана в атмосферу из-за окисления метана в водной толще, однако, из-за большой разницы концентраций метана и кислорода в воде, растворенный метан практически не оказывает влияния на содержание кислорода. Для оценки качества кали-

бровки и воспроизводимости моделью результатов наблюдений использовался параметр *RMSE* (root mean square error) – среднеквадратическая ошибка модели (*MOD*) относительно данных измерений (*OBS*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (OBS_i - MOD_i)^2}. \quad (1)$$

В табл. 2 представлены значения выбранного параметра ошибки для всех трех этапов калибровки модели. Ошибка для температуры составляет  $2,24^{\circ}\text{C}$ , для содержания кислорода в воде –  $2,52 \text{ мг/л}$ , что является приемлемым результатом, так как небольшие отклонения по температуре и содержанию кислорода в воде незначительно влияют на процессы генерации и окисления метана в водохранилище в модельных расчетах. Ошибка для удельных потоков метана очень мала, что говорит об очень хорошем качестве воспроизведения моделью натурных данных об эмиссии метана.

Таблица 2

**Оценка качества калибровки модели LAKE по натурным данным о температурном, кислородном режиме водохранилища и удельных потоках метана в атмосферу**

Этап калибровки	Количество измерений	RMSE
Температура	212	2,24
Содержание кислорода	46	2,52
Удельные потоки метана	4	0,26

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

**Гидрологический режим.** Во время летних экспедиционных работ уровень воды был относительно высокий, близкий к НПУ, особенно в 2022 и 2023 гг. В период экспедиции 2023 г. в отличие от предыдущих полевых исследований происходило наполнение Колымского водохранилища. За время проведения полевых работ уровень воды вырос с 449,05 до 450,17 м, с незначительным понижением на 5 см 11 августа (рис. 1). Период экспедиционных исследований зимой 2022 г. пришелся на продолжение стадии сработки водохранилища. Во время экспедиции уровень понизился от 437,6 до 436,4 м БС. Таким образом, на 16 апреля уровень воды на 4,4 м превышал уровень мертвого объема, составляющий 432 м. Общий расход воды колебался около  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ . Расход через водосбросы прекратился 18.09.2021 и в течение всего периода проведения экспедиции был нулевым.

**Температурный и кислородный режим.** В летний период распределение температуры соответствует периоду прямой температурной стратифи-

кации. На большей части акватории Колымского водохранилища в поверхностном слое содержание кислорода составляло 7–10 мг/л. В придонных слоях дефицита кислорода не наблюдалось, однако, в наиболее глубоких местах насыщение кислородом составляло 30–40%. Электропроводность воды была  $80\text{--}90 \text{ мкСм/см}$  и закономерно увеличивалась ко дну до  $150 \text{ мкСм/см}$  в пределах глубоких участков и до  $110 \text{ мкСм/см}$  – в более мелких. Средняя температура воды подо льдом во время съемки в апреле 2022 г. (его толщина была 2–2,3 м) составляла  $0,3^{\circ}\text{C}$ , на глубине 55–70 м возрастала до  $2,5\text{--}2,7^{\circ}\text{C}$ .

Термодинамический режим определяет процессы перемешивания и в значительной степени влияет на биохимические процессы. Для калибровки были использованы данные натурных наблюдений на нескольких опорных станциях в нижней части водоема с разными глубинами. На основании осреднения этих результатов можно получить средний для водоема профиль температуры по глубине. На рис. 2 приведены примеры сравнения результатов моделирования и натурных данных по температуре воды при разной стратификации водной толщи.

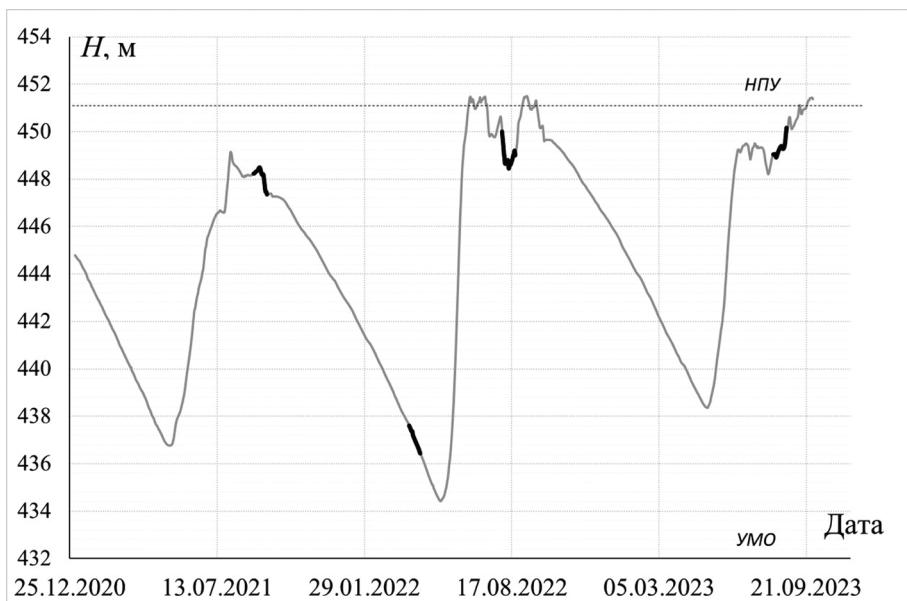


Рис. 1. Уровень воды в период проведения экспедиций (выделено жирным)

Fig. 1. Water level during field surveys (highlighted in bold)

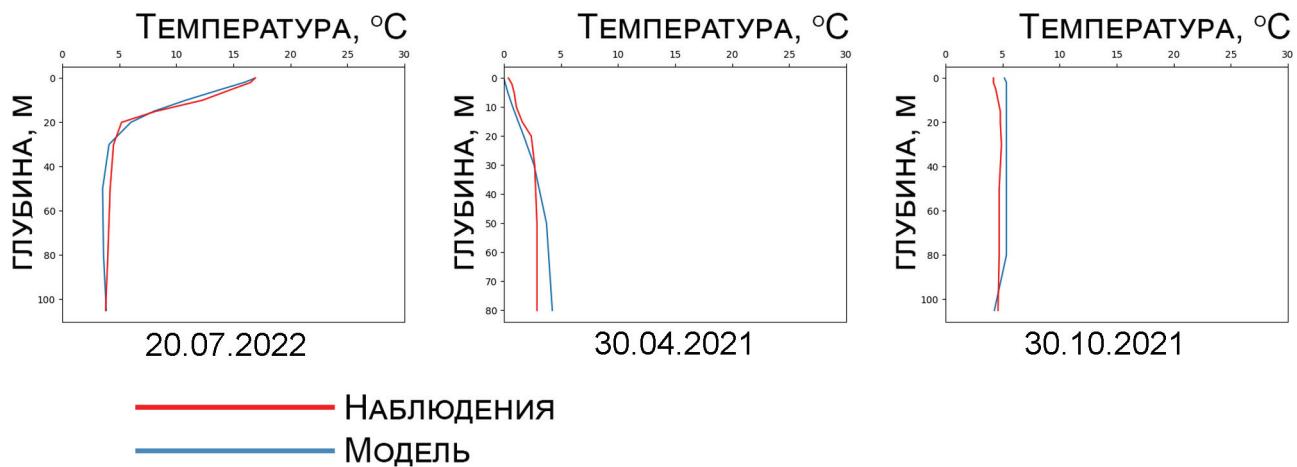


Рис. 2. Результаты воспроизведения профилей температуры по глубине моделью LAKE в сравнении с данными измерений в разные сезоны года

Fig. 2. Results of reproducing temperature profiles by depth using the LAKE model compared with the measurement data for different seasons of the year

Температурный режим Колымского водохранилища характерен для глубоководных водоемов boreального пояса (рис. 3). Наибольшая изменчивость температуры воды наблюдается в верхних горизонтах водоема, около 20–25 м. Максимальные градиенты температуры наблюдаются в летний период, когда в водоеме отчетливо выделяются зоны эпиполимниона.

В силу своего северного расположения водохранилище не прогревается до температур более 18°C. В период весеннего и осеннего конвективного перемешивания профиль температуры выравнивается, температура воды в этот период близка к 4°C.

В зимний период наблюдается обратная температурная стратификация. Ниже 25 м в водохранилище колебания температуры в течение всего годового цикла менее подвержены изменениям, однако, в течение летнего периода возможен постепенный прогрев самых глубоких слоев воды. Такой эффект происходит как в результате молекулярной диффузии тепла из верхних горизонтов, так и благодаря вертикальной адвекции водных масс, воспроизведенных в модели. Из-за расположения водосбросов ГЭС на достаточно больших глубинах (около 80 м) прогретые водные массы с поверхности постепенно опускаются к горизонтам сброса воды из-за верти-

кальных компонент скорости течений. Как видно из результатов модели (см. рис. 3), именно до этих горизонтов происходит более интенсивный прогрев гиполимниона в летний период. Этот процесс происходит медленно, так как Колымское водохранилище относится к слабопроточным водоемам, среднегодовой коэффициент его водообмена составляет около 1 год<sup>-1</sup>.

Стоит отметить высокую межгодовую изменчивость термического режима водоема, которая была получена по результатам модели и по данным натуральных измерений. Так, наиболее теплый за исследуе-

мый период был год 2023-й. В летний период этого года эпилимнион имел наибольшую мощность, а период устойчивой стратификации был более продолжителен, чем в остальные годы. Кроме того, из-за более интенсивного прогрева эпилимниона в этот год, в период осенней конвекции высокие для Колымского водохранилища температуры (более 8°C) достигали глубоких слоев воды (до 70–80 м) и продержались практически до момента ледостава. Самыми холодными были 2020 и 2021 гг., схожие между собой по термическому режиму. Даже в поверхностных горизонтах температура не превышала 15°C.

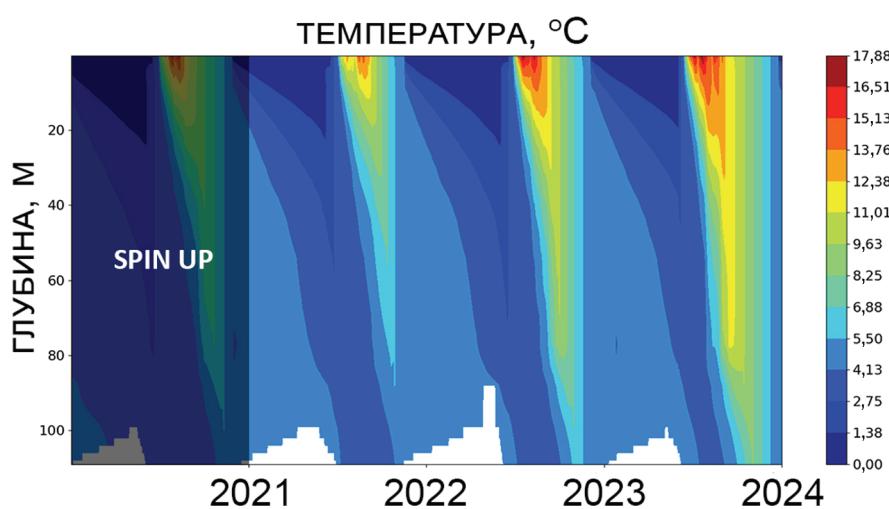


Рис. 3. Распределение температуры воды Колымского водохранилища по глубине за период 2020–2023 гг. по результатам модели LAKE

Fig. 3. Distribution of water temperature in the Kolyma Reservoir by depth for the period 2020–2023 according to the LAKE model

Содержание растворенного в воде кислорода в водохранилище, главным образом, зависело от глубины: на поверхности концентрации достигали 6 мг/л, на глубине 55–70 м держались на уровне 1–2 мг/л. На всех промерных вертикалях на 30-метровой глубине содержание кислорода превышало 2 мг/л. Уровень воды был низким, соответствовал периоду зимне-весенней сработки водохранилища.

Полученные данные подтверждают особенности гидроэкологического режима водохранилища: относительно низкая температура воды в придонных слоях в течение всего года и относительно благоприятный кислородный режим.

По результатам расчета модели LAKE 3.2 кислородный режим Колымского водохранилища характеризуется хорошей аэрированностью водной толщи на протяжении всего периода моделирования (рис. 4А).

Наибольшие концентрации кислорода наблюдаются в конце осеннего периода перед ледоставом,

когда возможен обмен с атмосферой, и растворимость кислорода в воде наибольшая из-за низких температур. За период ледостава содержание кислорода постепенно убывает, наиболее интенсивно это происходит в придонных горизонтах из-за потребления его донными отложениями. Бескислородных условий (менее 1 мг/л) в водоеме не возникает, однако в последние месяцы перед вскрытием ледяного покрова содержание кислорода на глубинах более 90 м может снижаться до 4 мг/л. Среднее содержание кислорода в Колымском водохранилище составляет около 9–11 мг/л по результатам расчета модели.

Наблюдения за растворенным в воде кислородом, по которому осуществлялась калибровка кислородного режима в модели, проводились в период полевых съемок. Наибольшее количество полученных данных имеет достаточно высокую дисперсию, которая не воспроизводится в модели, и которая, возможно, связана с погрешностью измерительных

приборов. Однако, на примере съемки в августе 2023 г. видно, что модель хорошо воспроизводит аэрированную структуру водной толщи Колымского водохранилища (рис. 4Б).

**Концентрации и удельные потоки метана.** В среднем за три летних сезона концентрации растворенного метана оказались невелики (табл. 3) (по сравнению с другими исследуемыми водными объектами [Ломов и др., 2024]), при этом выявле-

ны пространственные закономерности его изменения (рис. 5). От плотины к верховьям водохранилища концентрация увеличивается от 0,5–1,0 до 2–5 мкл $\text{CH}_4$ /л. У дна концентрация также возрастает (рис. 6). Анализ проб, взятых в поверхностном слое в устьях рек, впадающих в Колымское водохранилище, показал также крайне низкую концентрацию. Поток метана в целом невелик, средний (удельный) поток составляет 1–3 мг $\text{CH}_4$ /(м<sup>2</sup>×сут).

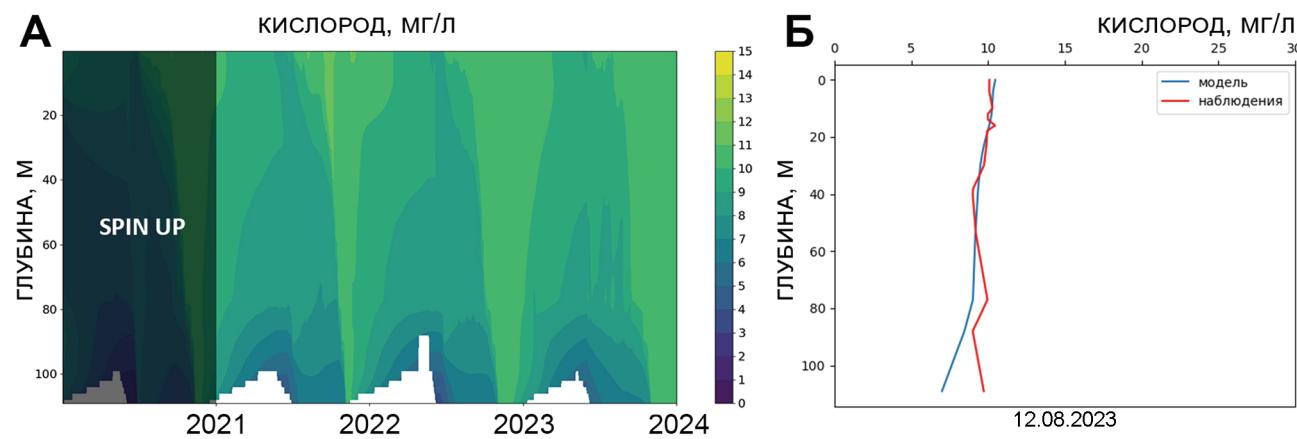


Рис. 4. Распределение растворенного кислорода в воде Колымского водохранилища по глубине за период 2020–2023 гг. по результатам модели LAKE (А); распределение кислорода по глубине 12.08.2023 по наблюдениям и по результатам модели (Б)

Fig. 4. Distribution of dissolved oxygen in the water of the Kolyma Reservoir by depth for the period 2020–2023 according to the LAKE model (A), distribution of oxygen by depth on 12 August 2023 according to observations and modeling results (B)

Таблица 3

**Сводная таблица полученных результатов наблюдений на Колымском водохранилище (все данные относятся к периоду экспедиции)**

Даты (период экспедиции)	1–19.09.2021	1–16.04.2022	4–22.08.2022	7–25.08.2023
Уровень воды, м	448,44	436,4	448,64	449,23
Площадь водохранилища при текущем уровне, км <sup>2</sup>	421	304	423	427
Средний (удельный) поток, мг $\text{CH}_4$ /(м <sup>2</sup> ×сут)	3,67	–	0,92	1,27
Валовый (суммарный со всего водохранилища) поток, т $\text{CH}_4$ /сут	1,56	–	0,4	0,5
Средняя концентрация метана в воде, мкл $\text{CH}_4$ /л	4,42	12,97	1,01	1,55
Медианная концентрация метана в воде, мкл $\text{CH}_4$ /л	0,54	2,64	0,78	0,97

Концентрация метана в воде подо льдом (апрельская съемка 2022 г.) значительно больше летних показателей (см. рис. 6) и в среднем составила 12,97 мкл $\text{CH}_4$ /л. При этом, так как придонные температуры слабо изменяются в течение всего года, что было показано выше, генерация метана продолжается и зимой, и метан в виде

диффузионного потока поднимается от дна к поверхности ледяного покрова. Кроме того, в зимний период отсутствует выход метана в атмосферу, и растворенный газ может накапливаться подо льдом. По описанным причинам содержание метана в воде в подледный период выше, чем в период открытой воды.

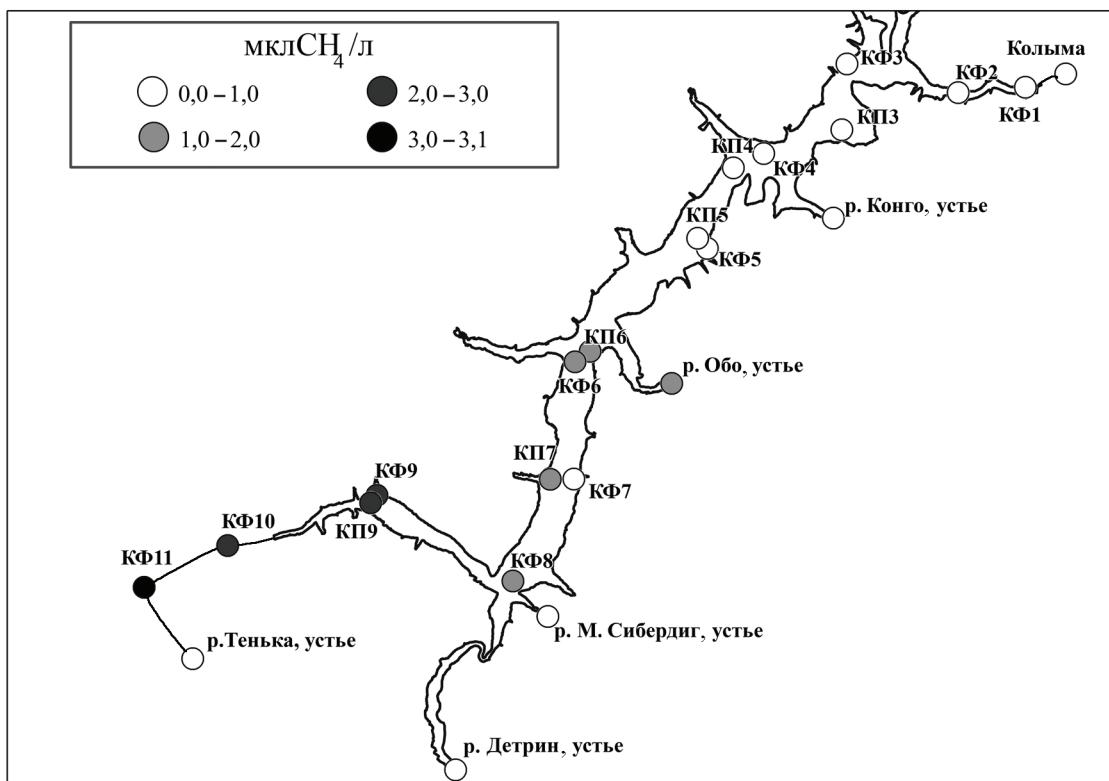


Рис. 5. Распределение концентрации метана в поверхностном слое Колымского водохранилища в августе 2023 г.

Fig. 5. Distribution of methane concentration in the surface layer of the Kolyma Reservoir in August 2023

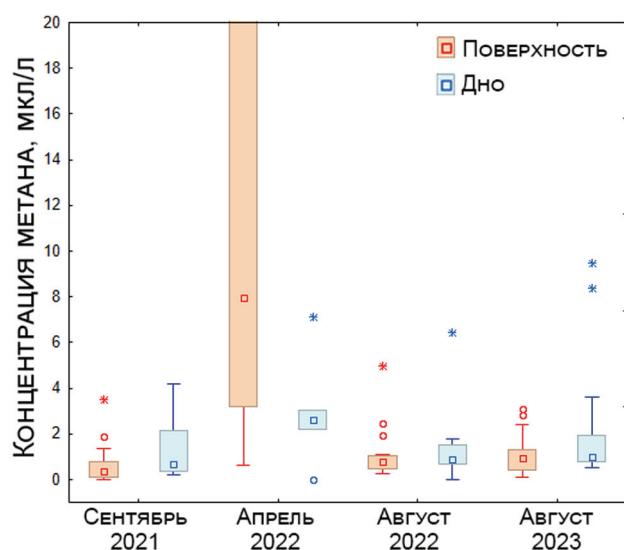


Рис. 6. Концентрация метана в различные сезоны по данным натурных измерений (мклCH<sub>4</sub>/л)

Fig. 6. Methane concentrations in different seasons based on field measurements (mclCH<sub>4</sub>/l)

Полученные результаты натурных наблюдений за удельными потоками и концентрациями метана закономерны для географического положения Колымского водохранилища. В исследовании, посвященном распределению эмиссии метана по субъектам РФ, авторами отмечается, что, по результатам

анализа баз данных о водохранилищах разных климатических поясов, выявляется четкая закономерность убывания эмиссии метана к полярным регионам [Гречушникова, Школьный, 2019]. Кроме того, у водохранилищ умеренно-холодного климата с замедленным водообменом (к таковым относится и Колымское водохранилище) величина удельного метана ниже, чем у высокопроточных водоемов. Кроме того, низкие значения эмиссии метана из водохранилищ бореальной зоны отмечаются и в статье, посвященной глобальной оценке эмиссии метана с водохранилищ мира [Johnson et al., 2021].

Анализ результатов полевых исследований показывает, что донные отложения, являющиеся основным источником метана, содержат мало органического вещества (для преобладающей части водохранилища не более 10%). Содержание органического углерода в воде достаточно небольшое – 4–5 мгС/л и мало меняется от года к году. Почти все приходится на растворенную форму. В целом содержание метана в толще воды также невелико (не более 4 мклCH<sub>4</sub>/л летом и 12 мклCH<sub>4</sub>/л зимой). Это способствует формированию низкого удельного потока метана с поверхности (1–3 мгCH<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup>×сут)). Эмиссия метана со всей поверхности водохранилища составила 0,4–0,5 тCH<sub>4</sub>/сут в летний период 2022–2023 гг. и 1,56 тCH<sub>4</sub>/сут в 2021 г.

В табл. 4 представлено сравнение удельных потоков метана из Колымского водохранилища по результатам моделирования в сравнении с данными наблюдений. В качестве дополнительной информации для сравнения здесь и далее приведены данные по Рыбинскому водохранилищу, на котором также работали авторы статьи. По результатам данного сравнения отчетливо видно, как значимо могут различаться водохранилища северных и умеренных широт. Такие различия связаны, прежде всего, с температурным режимом водоемов, а также составляющими метанового цикла в водной экосистеме.

Стоит отметить, что в Колымском водохранилище непосредственное антропогенное влияние на эмиссию метана невелико. Внешняя антропоген-

ная нагрузка на водоем, которая может приводить к поступлению биогенных элементов и органического вещества с водосбора, что влияет на режим кислорода и, следовательно, метана в воде, очень низка из-за малой плотности населения на водосборе водохранилища. Кроме того, низкие величины потоков метана говорят о том, что преобладающий перенос метана происходит в виде его диффузии в водной толще (это подтверждается и модельными расчетами, что будет показано ниже). Режим регулирования водохранилища, несмотря на существенные колебания уровня воды, слабо оказывает влияние на диффузионную составляющую удельного потока метана в атмосферу, в отличие от переноса пузырьков [Harrison et al., 2016].

Таблица 4

**Средние значения удельного потока метана по данным моделирования и полевых измерений**

Водохранилище	Средний УП метана по данным наблюдений, $\text{мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	Средний УП метана по результатам модели за периоды проведения полевых кампаний, $\text{мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$
Рыбинское	66,9	67,9
Колымское	1,47	1,63

**Оценка годовой эмиссии метана из Колымского водохранилища.** На рис. 7 представлено воспроизведение удельных потоков метана из Колымского водохранилища по результатам моделирования в сравнении с данными наблюдений. Суммарный УП метана из водохранилища в модели является суммой трех составляющих:

– УП с поверхности водоема – сумма диффузионного и пузырькового потока метана;

– УП при весеннем выбросе метана, который происходит в модели при вскрытии ледяного покрова. При весеннем выбросе весь метан, который был аккумулирован подо льдом, а также метан в пузырьках, которые вмерзли в лед, выходит в атмосферу. Данные по весеннему выбросу в модели не были откалиброваны по измерениям потоков метана, так как полевые кампании в момент вскрытия ледяного покрова водоема провести невозможно из-за сложной ледовой обстановки. Однако, для некоторых водохранилищ в рамках упомянутого выше проекта при финансировании ПАО «РусГидро» были проведены верхние оценки весеннего выброса по соотношению запасов метана в воде до и после вскрытия льда. Такие оценки показали, что величина весеннего выброса метана по модели может быть несколько выше оценок по натурным данным, однако, это завышение обусловлено тем, что в натурных данных не был учтен объем метана в пузырьках, которые вмерзли в ледяной покров, в то время как в модели этот процесс реализован. Поэтому воспроизведение

моделью весенных выбросов можно считать адекватным;

– дегазация метана при сбросе воды через гидроагрегаты ГЭС. Она рассчитывалась как произведение концентрации метана на горизонтах расположения водосбросных отверстий на расход воды. Таким образом, данные о дегазации приведены сразу в выражении эмиссии метана, а не удельного потока.

В табл. 5 приведены оценки среднесуточных значений описанных выше составляющих выброса метана в атмосферу для Колымского и Рыбинского водохранилищ, исследуемых в рамках проекта ПАО «РусГидро». При очень низких значениях УП метана для описываемого Колымского водохранилища, весенний выброс может достигать больших значений. Дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф крайне мала.

Оценка годовой эмиссии метана из водохранилища проводилась на основе результатов расчета модели. В оценку суммарной эмиссии включены все три составляющие потока метана, показанные в табл. 5. Средний УП с поверхности водохранилища за сутки умножался на площадь водохранилища, рассчитанную с учетом кривой площадей и данных об уровне водоема за каждый день. Весенний выброс метана рассчитывался как произведение УП метана на площадь водохранилища в день вскрытия ледяного покрова. Расчет дегазации описан выше. Наибольшие значения удельного потока наблюдаются при весеннем выбросе метана. Он происходит в момент

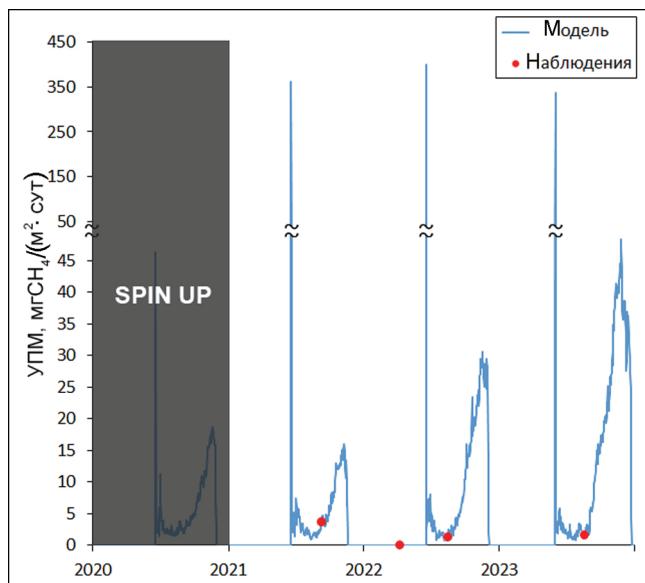


Рис. 7. Удельный поток метана с поверхности Колымского водохранилища по результатам модели и по данным натурных наблюдений

Fig. 7. Specific methane flux from the surface of the Kolyma Reservoir based on modeling results and field observations

вскрытия ледяного покрова. При этом в модели также учтено разрушение пузырьков и окисление метана в ледяном покрове, скорости этих процессов были заданы в соответствии с натурными и модельными экспериментами, проведенными в [Canelhas et al., 2006; Greene et al., 2014]. В этих публикациях было получено, что в зимний период в подледном слое может быть окислено около 52–56% метана. В соответствии с этим в модельной конфигурации параметр окисления метана в ледяном покрове был задан равным 50%. После вскрытия ледяного покрова в модели наблюдаются повышенные значения потоков из-за активной весенней конвекции. Метан, накопившийся в глубинных горизонтах водохранилища, поступает к поверхности и выходит в атмосферу. После этого в период летней стратификации потоки метана достигают своего годового минимума. При разрушении летней стратификации осенью возникает конвективное перемешивание, которое приводит

к нагреванию нижних горизонтов водохранилища. Этому также способствует и вертикальная адвекция водных масс, описанная выше. Это, в свою очередь, приводит к увеличению генерации метана в донных отложениях, так как она напрямую зависит от температуры. В результате чего в осенний период наблюдается рост УП метана, который достигает своего максимума к моменту остывания водной толщи перед ледоставом. Особенно значительные потоки метана наблюдались в 2023 г., когда из-за осеннего перемешивания водная толща была прогрета наиболее сильно, потоки метана к концу осени этого года достигали в модели  $45 \text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . Стоит отметить, что для УП метана в атмосферу из Колымского водохранилища характерен преимущественно диффузионный механизм переноса. Такая особенность не характерна, например, для водохранилищ центральной части России, где основной перенос метана к поверхности осуществляется пузырьковым потоком. В выбранном для сравнения Рыбинском водохранилище доля пузырькового потока (как по данным измерений, так и по результатам модели) может превышать 95% от общей эмиссии в атмосферу [Репина и др., 2023]. В Колымском водохранилище такое соотношение потоков обусловлено рядом факторов. Во-первых, Колымское водохранилище очень глубоководное, при таких глубинах растворимость метана в воде и поровом растворе донных отложений велика. Из-за этого пузырьки метана (которые образуются при превышении порога растворимости газа в воде) либо не образуются, либо растворяются при подъеме к поверхности воды. Во-вторых, насыщение воды метаном не достигается из-за низкой скорости генерации, так как Колымское водохранилище намного меньше подвержено прогреву, чем водоемы европейской территории страны. В методических рекомендациях [Goldenfum et al., 2010] отмечается, что пузырьковые эмиссии метана характерны для глубин менее 20–30 м при высоких температурах воды и большом содержании органического вещества. Как показано по результатам измерений и моделирования, подобные условия не характерны для Колымского водохранилища.

Таблица 5

Оценка среднесуточных значений УП метана из водохранилища по результатам модели (значения УП с поверхности приведены с учетом доверительного интервала 95%, полученного при сравнении результатов модели и данных наблюдений)

Водохранилище	УП метана с поверхности, $\text{мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	УП метана при весеннем выбросе, $\text{мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (мин – макс)	Дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф, $\text{кгCH}_4/\text{сут}$
Рыбинское	$24,7 \pm 3,6$	0,9–84,8	24,2
Колымское	$5,16 \pm 0,57$	336–399	39,3

Однако стоит отметить, что весенний выброс метана, наоборот, полностью происходит за счет пузырькового потока. Растворенный метан, переносимый диффузией, в зимний период будет в значительной степени окислен в водной толще, в то время как пузырьковый перенос не подвержен окислению и пузырьки метана могут вмерзать в ледяной покров, что при вскрытии и приводит к выбросу метана. В табл. 6 приведены результаты оценки годовой эмиссии метана за период 2021–2023 гг.

Помимо эмиссии с поверхности учитывалась также дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф, которая также получена на основе результатов моделирования. По сравнению с диффузионной и пузырьковой эмиссией ее вклад в общий выброс метана невелик. Оценка эмиссии метана была получена произведением общего УП на площадь водоема, с учетом изменения площади водного зеркала при разном уровне воды. Результаты этой оценки представлены в табл. 6.

Таблица 6

### Оценка годовой эмиссии метана из Колымского водохранилища за 2021–2023 гг.

Год	Эмиссия метана, тонн в год			
	Диффузионная	Пузырьковая	Дегазация	Общая
2021	343	133	8,89	485
2022	729	175	16,8	920
2023	1332	120	17,4	1470
<i>Среднее</i>	<i>801</i>	<i>143</i>	<i>14,4</i>	<i>958</i>

### ВЫВОДЫ

Малое количество органического вещества в донных отложениях (для преобладающей части водохранилища не более 10%), невысокое содержание метана в толще воды (в среднем  $\text{CH}_4$  не более 4 мкл/л летом и 12 мкл/л зимой), небольшое количество содержания органического углерода в воде (4–5 мгС/л и мало меняется от года к году в основном в растворенной форме) способствует формированию низкого УП метана с поверхности (1–3  $\text{мгCH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$ ). По результатам измерений эмиссия метана со всей поверхности водохранилища составила 0,4–0,5  $\text{тCH}_4/\text{сут}$  в летний период 2022–2023 гг. и 1,56  $\text{тCH}_4/\text{сут}$  в 2021 г.

С помощью модели LAKE 3.2 удалось получить адекватное воспроизведение суточной эмиссии метана из водохранилищ, которое соответствует дан-

ным, полученным в ходе проведенных полевых измерений УП метана из водохранилищ. Расчеты по модели позволяют получить репрезентативную оценку эмиссии метана из исследованных водохранилищ, которая учитывает изменчивость УП метана в течение года, что невозможно сделать по ограниченному числу проведенных полевых кампаний в труднодоступном для исследований Колымском водохранилище. Средняя годовая эмиссия метана из Колымского водохранилища за период с 2021 по 2023 гг. составляет 958 т в год. Межгодовая изменчивость эмиссии метана весьма существенна, что объясняется динамикой температурного режима, который определяет скорость генерации метана в донных отложениях, а также различием в весеннем выбросе, который происходит в виде пузырьковой составляющей потока.

**Благодарность.** Полевые исследования на водохранилище выполнены при поддержке ПАО «РусГидро» (договор № 1010-416-2021 от 26.04.2021), частично в рамках госзадания «Мониторинг и анализ динамики эмиссии климатически-активных газов из наземных и пресноводных экосистем арктической зоны России» (FMWR-2025-0011), № 1024100700065-0-1.5.10, моделирование и анализ результатов – при поддержке гранта РНФ № 24-17-00084.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах // Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та, 2021. 366 с.  
Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71.

Дзюбан А.Н. Метан в поверхностных водах как показатель их качества // Вода: химия и экология. 2012а. № 7. С. 7–12.

Дзюбан А.Н. Экологические аспекты исследований содержания метана в природных водах // Вода: химия и экология. 2012б. № 11. С. 10–15.

- Лисина А.А., Сазонов А.А., Фролова Н.Л. и др. Чувствительность водного стока реки Колымы к современным климатическим изменениям // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 3. С. 109–123.
- Ломов В.А., Фролова Н.Л., Ефимов В.А. и др. Изменчивость содержания и потоков метана в Рыбинском водохранилище по результатам натурных наблюдений в разные сезоны года // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 4. С. 545–564.
- Метан в водных экосистемах / Федоров Ю.А., Тамбивая Н.С., Гарькуша Д.Н. и др. Ростов н/Д, М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
- Общая характеристика бассейна р. Колыма // Отчет по теме «Разработка проекта СКИОВО, включая НДВ, бассейна р. Колыма» / под ред. Е.И. Ветровой. М., 2011. Кн. 1. 209 с.
- Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л. и др. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718. DOI: 10.31857/S0321059622060141.
- Репина И.А., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. DOI: 10.31857/S2587556623060080.
- Сорокин Ю.И. Метан и водород в воде волжских водохранилищ // Тр. Ин-та биол. водохр. 1960. Т. 3. № 6. С. 50–58.
- Canelhas M.R., Denfeld B.A., Weyhenmeyer G.A. et al. Methane oxidation at the water-ice interface of an ice-covered lake, *Limnol. Oceanogr.*, 2006, vol. 61, p. S78–S90.
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis, *BioScience*, 2016, vol. 66(11), p. 949–964. DOI: 10.1093/biosci/biw117.
- Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I. et al. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP, *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, p. 33–39.
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower, *Nature*, 2006, vol. 444, p. 524–525.
- Goldenfum J., Abe D.S., Abril G. et al. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs, UK, The International Hydropower Association, 2010, 154 p.
- Greene S., Walter Anthony K.M., Archer D. et al. Modeling the impediment of methane ebullition bubbles by seasonal lake ice, *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, p. 6791–6811.
- Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir, *J. of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, p. 3006–3020.
- Harrison J., Deemer B., Birchfield M. et al. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission, *Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 1, p. 1–11.
- Ion I.V., Ene A. Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs. A Review, *Sustainability*, 2021, vol. 13, 11621, DOI: 10.3390/su132111621.
- IPCC, 2011: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, 2391 p.
- Johnson M., Matthews E., Bastviken D. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs, *J. of Geophys. Research: Biogeosciences*, 2021, vol. 126, e2021JG006305.
- Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M. et al. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir, *Water*, 2024, vol. 16(1), no. 76, 25 p., DOI: 10.3390/w16010076.
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V. et al. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk reservoir in summer period, *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 1–7.
- Miller B., Arntzen E., Goldman A. et al. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions, USA, *Environmental Management*, 2017, vol. 60, p. 1–15.
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources, *Nature Geoscience*, 2021, vol. 14, no. 4, p. 225–230.
- Zhao Yiyang, Suning Liu, Haiyun Shi Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective, *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, no. 10, p. 1–13.

#### Электронные ресурсы

ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 13 с. URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=198201> (дата обращения 01.03.2024).

Колымское водохранилище. URL: <https://kolymaenergo.rushydro.ru/hpp/kolymskaya-ges/> (дата обращения 01.03.2024).

LAKE – An extended one-dimensional model of themodynamic, hydrodynamic, and biogeochemical processes, URL: <https://mathmod.org/lake/> (дата обращения 20.06.2024).

Приказ Росводресурсов от 28.11.2023 № 287 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Колымского водохранилища» (зарег. в Минюсте России 22.02.2024 № 77332). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_470701/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_470701/) (дата обращения 20.06.2024).

Поступила в редакцию 09.07.2025

После доработки 10.09.2025

Принята к публикации 17.10.2025

# METHANE EMISSIONS FROM THE KOLYMA RESERVOIR: OBSERVATION DATA AND RESULTS OF NUMERICAL SIMULATIONS

N.L. Frolova<sup>1</sup>, A.A. Sazonov<sup>2</sup>, V.A. Lomov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

<sup>2</sup> Water Problems Institute of RAS

<sup>3</sup> Research Computing Center of the Lomonosov Moscow State University  
Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Laboratory of Greenhouse Gases

<sup>1</sup> D.Sc. in Geography, Head of the Department; e-mail: frolova\_nl@mail.ru

<sup>2</sup> Ph.D. in Geography, Senior Lecturer; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

<sup>3</sup> Ph.D. in Geography, Junior Scientific Researcher; e-mail: lomson620@mail.ru

Based on the results of in-situ measurements of methane concentrations in water and specific fluxes from the water surface, methane emission from the Kolyma reservoir in the warm period of the year was estimated for the first time. The catchment area of the reservoir is completely located in the permafrost zone. The specific flux was measured by the floating chamber method, and the methane content in samples was determined by the headspace method [Goldenfum et al., 2010]. The LAKE 3.2 model [Lomov, Stepanenko et al., 2024] was chosen as a main tool for numerical simulation of specific methane fluxes from the Kolyma reservoir. The paper integrates the materials of seasonal observations in September 2021, April and August 2022, and August 2023. The spatial and seasonal variability of both methane content and methane emission was revealed. The low amount of organic matter in sediments (no more than 10% for the predominant part of the reservoir), low methane content in the water mass (on average no more than 4  $\mu\text{LCH}_4/\text{L}$  in summer and 12  $\mu\text{LCH}_4/\text{L}$  in winter), and low organic carbon content in the water (4–5 mgC/L) favor the formation of a low specific flux (SF) of methane from the surface (1–3 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/day). Based on observations, the methane emission from the entire reservoir surface was 0.4–0.5 tonnes of CH<sub>4</sub>/day in the summer period 2022–2023 and 1.56 tonnes of CH<sub>4</sub>/day in 2021.

Using the model it was possible to obtain an adequate simulation of daily methane emission from the Kolyma reservoir, which corresponds to the data obtained in the course of field measurements of methane SF from the reservoir. The model calculations provide a representative estimate of methane emission from the studied reservoir, which takes into account the variability of methane flow during the year. The latter doesn't seem possible because of the limited number of field surveys for the Kolyma reservoir, which is difficult to access for research. The average annual methane emission from the Kolyma reservoir for the period from 2021 to 2023 is 958 tonnes per year. The interannual variability of methane emission is quite significant, and could be explained by the dynamics of the temperature regime, which determines the rate of methane generation in bottom sediments, as well as by the difference in its spring release, which occurs as a bubble component of the flow during the ice cover breakup in spring.

**Keywords:** greenhouse gas emissions, water temperature, field research, modeling

**Acknowledgements.** Field studies at the reservoir were financially supported by the RusGidro (contract 1010-416-2021 dated 26.04.2021) and partly conducted under the State Assignment No. 1024100700065-0-1.5.10 (FMWR-2025-0011); modeling and analysis of the results were financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00084).

## REFERENCES

- Canelhas M.R., Denfeld B.A., Weyhenmeyer G.A. et al. Methane oxidation at the water-ice interface of an ice-covered lake, *Limnol. Oceanogr.*, 2006, vol. 61, p. S78–S90.
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis, *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, p. 949–964, DOI: 10.1093/biosci/biw117.
- Dzyuban A.N. Ekologicheskie aspekty issledovanij soderzhaniya metana v prirodnnyh vodah [Ecological aspects of studying the methane concentrations in natural water], *Voda: himiya i ekologiya*, 2012b, no. 11, p. 10–15. (In Russian)
- Dzyuban A.N. Metan v poverhnostnyh vodah kak pokazatel ih kachestva [Methane in surface water as an indicator of its quality], *Voda: himiya i ekologiya*, 2012a, no. 7, p. 7–12. (In Russian)
- Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I. et al. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP, *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, p. 33–39.
- Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N. et al. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in aquatic ecosystems], Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ., 2005. 329 p. (In Russian)
- Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Faktory formirovaniya kontsentratsii metana v vodnykh ekosistemakh* [Factors of Formation of Methane Concentrations in Aquatic Ecosystems], Rostov-on-Don, Southern Fed. Univ. Publ., 2021, 366 p. (In Russian)
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower, *Nature*, 2006, vol. 444, p. 524–525.

- Goldenfum J., Abe D.S., Abril G. et al. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs, *UK: The International Hydropower Association*, 2010, 154 p.
- Grechushnikova M., Shkolny D. Otsenka emissii metana vodohranilischemi Rossii [Estimation of methane emission from reservoirs of Russia], *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problem, technologii, upravlenie*, 2019, vol. 2, p. 58–71. (In Russian)
- Greene S., Walter Anthony K. M., Archer D. et al. Modeling the impediment of methane ebullition bubbles by seasonal lake ice, *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, p. 6791–6811.
- Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir, *J. of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, p. 3006–3020.
- Harrison J., Deemer B., Birchfield M. et al. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission, *Washington: Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 1, p. 1–11.
- Ion I.V., Ene A. Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs, *A Review. Sustainability*, 2021, vol. 13, 11621, DOI: 10.3390/su132111621.
- IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.
- 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*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Piran et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, 2391 p.
- Johnson M., Matthews E., Bastviken D. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs, *J. of Geophys. Research: Biogeosciences*, 2021, vol. 126, e2021JG006305.
- Lisina A.A., Sazonov A.A., Frolova N.L. et al. Chuvstvitetnost vodnogo stoka reki Kolymy k sovremenennym klinaticheskim ismeneniyam [Sensitivity of the Kolyma river runoff to modern climate change], *Lomonosov Geography Journal*, 2024, vol. 79, no. 3, p. 108–122. (In Russian)
- Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M. et al. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir, *Water*, 2024, vol. 16(1), no. 76.
- Lomov V.A., Frolova N.L., Efimov V.A. et al. Izmenchivost coderzhaniya i potokov metana v Rybinskom vodohranilische po rezul'tatam naturnykh nablyudenij v raznye sezony goda [Variability of Methane Content and Fluxes in the Rybinsk Reservoir Based on Field Observations in Different Seasons of the Year], *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2024, vol. 60, no. 4, p. 545–564, <https://doi.org/10.1134/S0001433824700415>. (In Russian)
- Miller B., Arntzen E., Goldman A. et al. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions, USA, *Environmental Management*, 2017, vol. 60, p. 1–15.
- Obshchaya kharakteristika basseina r. Kolyma, kn. 1, Otchet po teme "razrabotka proekta SKIOVO, vkluchaya NDV, basseina r. Kolyma"* [General characteristics of the Kolyma River basin. Book 1. Report on the topic "Development of the SKIOVO project, including NDV, of the Kolyma River basin"], E.I. Vetrova (ed.), Moscow, 2011, 209 p. (In Russian)
- Repina I.A., Grechushnikova M.G., Frolova N.L. et al. Soderzhanie i potoki metana v Volzhskikh vodokhranilishchakh [Methane Concentration and Fluxes in Volga River Reservoirs], *Izv. RAN, Seriya geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 6, p. 899–913, DOI: 10.31857/S2587556623060080. (In Russian)
- Repina I.A., Terskii P.N., Gorin S.L. et al. Field Measurements of Methane Emission at Largest Reservoirs in Russia in 2021. The Start of Large-Scale Studies, *Water Resour.*, 2022, vol. 49, p. 1003–1008, DOI: 10.1134/S0097807822060148.
- Rodríguez-García V.G., Palma-Gallardo L.O., Silva-Olmedo F. et al. A simple and low-cost open dynamic chamber for the versatile determination of methane emissions from aquatic surfaces, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 2023, vol. 21, p. 828–836, DOI: 10.1002/lom3.10584.
- Sorokin Yu.I. Metan i vodorod v vode volzhskikh vodokhranilishch [Methane and hydrogen in the water of the Volga reservoirs], *Tr. Inst. Biol. Vodokhr.*, 1960, vol. 3, no. 6, p. 50–58. (In Russian)
- Zhao Yiyang, Suning Liu, Haiyun Shi. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective, *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, no. 10, p. 1–13.

#### Web sources

- GOST 23740-2016. Soils. Methods for Determining Organic Matter Content. Moscow: Standartinform, 2019, 13 p., URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=198201> (access date 01.03.2024).

LAKE – An extended one-dimensional model of themodynamic, hydrodynamic, and biogeochemical processes, URL: <https://mathmod.org/lake/> (access date 20.06.2024)

Kolymskoe vodokhranilishche [Kolyma Reservoir], URL: <https://kolymaenergo.rushydro.ru/hpp/kolymskaya-ges/> (access date 01.03.2024).

*Ob utverzhdenii Pravil ispol'zovaniya vodnykh resursov Kolymskogo vodokhranilishcha* ot 28.11.2023 No 287 [On approval of the Rules for the use of water resources of the Kolyma Reservoir dated 11/28/2023 No 287], Registered in the Ministry of Justice of Russia on 02/22/2024 No. 77332, URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_470701/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_470701/) (access date 20.06.2024).

Received 09.07.2025

Revised 10.09.2025

Accepted 17.10.2025