

УДК 556.55, 556.5.04

ЭМИССИЯ МЕТАНА И ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД

© 2024 г. П. Н. Терский^{a,e,*}, С. Л. Горин^{a,d}, И. А. Репина^{a,b}, С. А. Агафонова^{a,c}, М. В. Зимин^c,
В. П. Шестеркин^f, Ф. А. Щекотихин^c

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

^bМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские Горы ул., д. 1, стр. 4, Москва, 119234 Россия

^cМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Географический факультет,

Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

^dВсероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,

Окружной проезд, д. 19, Москва, 105187 Россия

^eИнститут водных проблем РАН, ул. Губкина, д. 3, Москва, 119333 Россия

^fИнститут водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия

*e-mail: pavel_tersky@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2023 г.

После доработки 16.04.2024 г.

Принята к публикации 29.05.2024 г.

На основе результатов натурных измерений концентраций метана в воде и его удельных потоков с водной поверхности впервые проведена оценка эмиссии метана в теплый период года из Зейского водохранилища — одного из крупнейших искусственных гидроэнергетических объектов на территории России. Данные были получены в ходе экспедиционных исследований, выполненных в сентябре 2021 г. и в июле 2022 г. Гидролого-гидрохимические съемки позволили получить сведения о термической, кислородной и химической структуре водной толщи водохранилища, а также провести комплексное районирование его акватории. Разработана цифровая модель рельефа ложа Зейского водохранилища, которая вместе с районированием позволила выполнить детализированные вычисления общей эмиссии метана из Зейского водохранилища. Установлено, что для водохранилища основными источниками органического вещества и метана являются заболоченные притоки и сток органического вещества с берегов, который поступает в прибрежные участки акватории. Эти участки аккумулируют аллохтонную органику и характеризуются высокими значениями потоков метана. Общий поток CH_4 с поверхности Зейского водохранилища значительно выше в летний период (когда наблюдается максимальный прогрев мелководий), чем в осенний. Полученные авторами коэффициенты эмиссии CH_4 из Зейского водохранилища (8.6–17.2 кг CH_4 /га) соответствуют коэффициентам, представленным в дополнениях к руководящим принципам МГЭИК 2019 года для бореальных водохранилищ.

Ключевые слова: эмиссия парниковых газов, метан, гидрологическая структура, гидрологический режим, температура воды, Зейское водохранилище, экспедиционные исследования, ЦМР (цифровая модель рельефа)

DOI: 10.31857/S0002351524040083 EDN: JGZPTN

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 г. ИФА им. А. М. Обухова РАН по заказу ПАО «РусГидро» начал трехлетний цикл исследований по теме «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов». Основу Проекта составляют натурные измерения баланса парниковых газов, прежде всего метана (CH_4), на крупных водохранилищах России [Репина и др., 2022]. Помимо своего фундаментального значения,

проблема оценки эмиссии парниковых газов (ПГ) имеет и практический аспект, особенно важный для России: в настоящее время отсутствует определенность в отношении углеродной нейтральности отечественных ГЭС, использующих водные ресурсы водохранилищ для выработки электроэнергии.

Эмиссия ПГ (и прежде всего метана) с поверхности водохранилищ происходит на протяжении всего срока их жизни. Но максимальные значения потоков наблюдаются в первые годы запол-

Таблица 1. Основные характеристики Зейского водохранилища

Характеристика	Величина	Источник данных
Уровень воды: УМО / НПУ / ФПУ*, м абс.	299.0 / 315.0 / 322.0	[Правила..., 2018]
Длина: при УМО и НПУ, км	225 и 290	Собственные расчеты
Ширина: наибольшая (средняя) при НПУ, км	24 (8.4)	[Схема..., 2010]
Глубина: наибольшая (средняя**) при НПУ, м	96 (28.7)	Собственные оценки
Площадь: при УМО / НПУ / ФПУ, км ²	1620 / 2419 / 2955	[Правила..., 2018]
Объем: при УМО / НПУ / ФПУ / среднемноголетний, км ³	36.3 / 68.4 / 87.4 / 63.0	[Правила..., 2018]
Площадь водосбора, км ²	83800	[Правила..., 2018]
Среднемноголетний приток воды с учетом осадков на акватории, км ³	25.2	[Правила..., 2018]***
Средний годовой сток в створе плотины, км ³	24.8	[Правила..., 2018]***
Испарение с акватории водоёма, км ³	0.38	[Правила..., 2018]***
Коэффициент водообмена****	0.39	Собственные расчеты

*УМО – уровень мертвого объема; НПУ – нормальный подпорный уровень; ФПУ – форсированный подпорный уровень.

** Средняя глубина при НПУ – частное от деления объема на площадь при НПУ *** Расчетные величины для периода 1901–2017 гг.

**** Коэффициент водообмена – частное от деления стока в створе плотины на среднемноголетний объем водохранилища.

нения. С течением времени эмиссия уменьшается, но в некоторых случаях снижения углеродной активности не только не происходит, но даже зафиксировано увеличение выбросов [Елистратов и др., 2014]. При небольших температурах метан устойчив к воздействию кислорода, в целом он химически нейтрален и не поглощается щелочами и слабыми кислотами [Гарькуша, Федоров, 2021].

Инвентаризация мировых данных по эмиссии метана с поверхности водохранилищ, приведенная в работе [Deemer et al., 2016] и уточненная в работах [Deemer, Holgerson, 2021; Rosentreter et al., 2021], показала, что эмиссия CH_4 существенно зависит от климатической зоны, проточности, возраста водоема и может сильно варьироваться даже в пределах одной климатической зоны.

Потоки ПГ из водохранилищ часто имеют суточную и синоптическую изменчивость – в масштабе времени от минут до часов и даже в течение отдельных дневных и ночных циклов [Sieczko et al., 2020; Гречушникова и др., 2019]. Также велика изменчивость этих потоков на сезонном масштабе – в зависимости от активности продукционно-деструкционных процессов, речного притока, колебаний уровня водохранилища, величины и динамики слоя перемешивания [Deemer et al., 2016; Гречушникова и др., 2018; Гречушникова и др., 2019].

Натурные исследования коллектива авторов на Зейском водохранилище имеют экспедиционный формат, при котором в течение нескольких дней дважды в год выполняются измерения по всей площади водохранилища. Поэтому в данной

работе не учитывается изменчивость потока CH_4 в масштабах времени меньше сезона (например, суточная и синоптическая).

Цель данной статьи – дать количественную характеристику гидрологических условий, как основы формирования эмиссии CH_4 , в водной толще Зейского водохранилища в теплый период, показать их связь с потоками CH_4 в относительно многоводных и маловодных условиях, дать оценку общей эмиссии CH_4 из водоема.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Зейское водохранилище – один из 9 водоемов, объектов исследования выполняемого авторами Проекта. Оно имеет характерные черты водохранилищ умеренного пояса. Но при этом ему свойственны и уникальные черты, благодаря сочетанию морфологических особенностей (обширная часть с глубинами до 50 м и каньонообразная часть с глубинами до 100 м), значительной площади и объема, высокой проточности и выраженной сезонности в гидрологическом режиме.

Зейское водохранилище находится на Дальнем востоке России у южных склонов Станового хребта. Оно образовано в среднем течении р. Зеи – крупнейшего притока р. Амур. Помимо главной реки, в водохранилище впадают такие крупные водотоки, как Гилуй, Брянта и Унаха. Для удобства планирования работ и описания результатов нами выделены характерные участки акватории, которые названы следующим образом: Малое море, Среднее море, Большое море и Каньон (рис. 1).

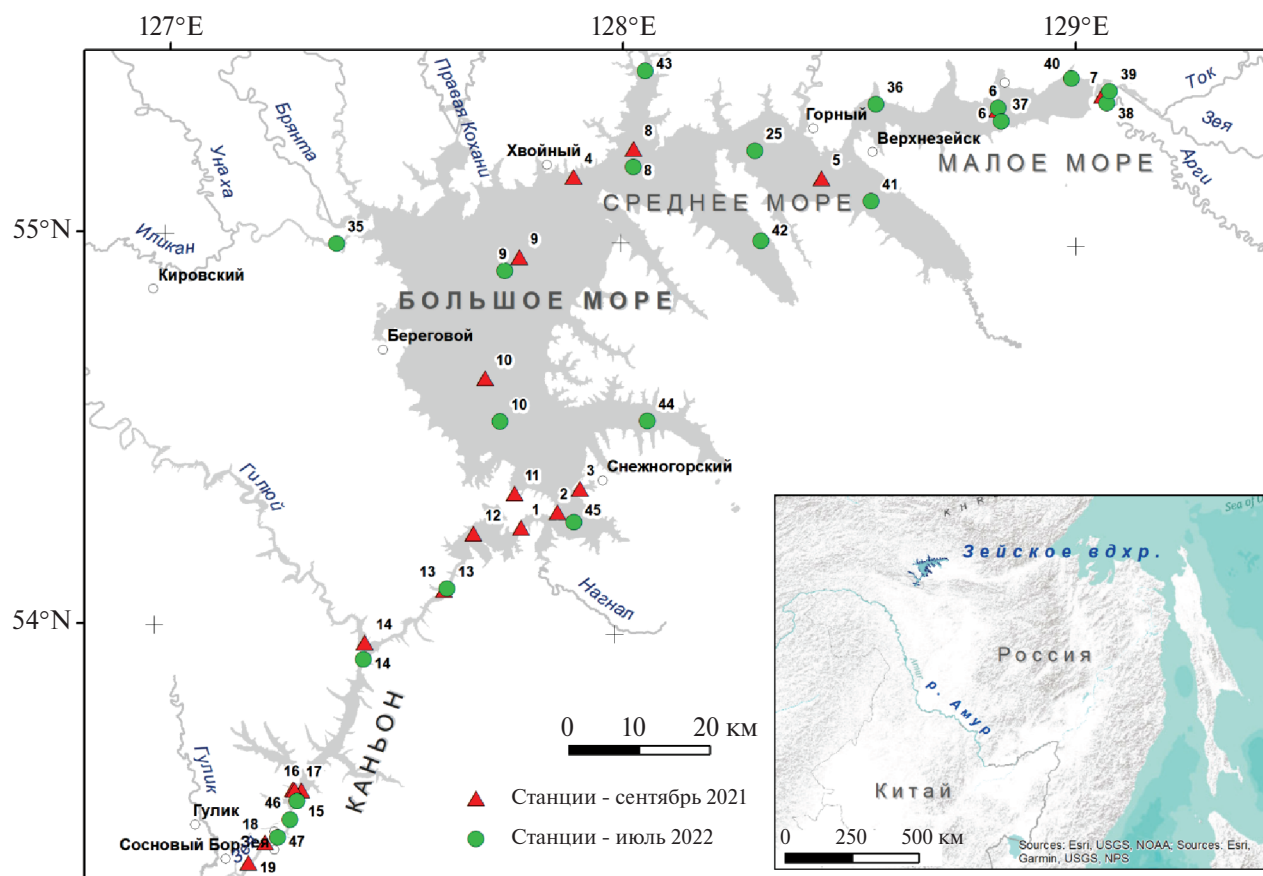


Рис. 1. Карта-схема Зейского водохранилища с местоположением станций полевых работ в 2021 и 2022 гг. Примечание: приводится сквозная нумерация для всей серии экспедиций; станции, имеющие одинаковый номер, характеризуют один и тот же однородный участок акватории водоема.

Заполнение чаши Зейского водохранилища началось в 1974 г., а до нормального подпорного уровня (НПУ) водоем наполнился в 1985 г. [Схема..., 2010]. Основные характеристики водохранилища приведены в табл. 1.

Согласно оперативным данным Зейской ГЭС [<http://www.rushydro.ru/>], среднеегодеглетний уровень воды за период 2005–2021 гг. составляет 312.6 м абс. Минимальный уровень наблюдается в марте-апреле – около 309–310 м абс., в отдельные годы опускается до 307 м абс. Максимальный уровень – 316–318 м абс. характерен для летне-осеннего периода, в отдельные годы (2007, 2013 и 2021 гг.) уровень может превышать 318 м абс.

Водный режим Зейского водохранилища определяется, главным образом, р. Зейя и ее крупнейшим притоком – р. Гилуей. По характеру внутригодового распределения стока эти реки относятся к Дальневосточному типу водного режима, которому присуща высокая водность в теплую часть года: весенне-летнее половодье, переходящее в высокие паводки во второй половине лета

и в начале осени. Зачастую дождевые паводки по своей величине (максимальному расходу воды и объему стока) превосходят половодье. Зимой речной сток минимален. В средний по водности год с мая по август в водохранилище поступает ~56% годового объема воды, в сентябре и октябре ~41%, а на долю зимних месяцев приходится всего ~3%. Для среднего по водности года доля дождевого питания превышает 70%, снегового достигает 25%, а грунтового – до 5% [Правила..., 2018]. В многолетнем плане среднегодовой приток речной воды в водохранилище изменяется от 431 до 1220 м³/с (в очень маловодный и очень многоводный годы, соответственно) [Правила..., 2018].

По химическому составу воды Зейского водохранилища относятся к ультрапресным водам гидрокарбонатного класса группы кальция [Шестеркин и др., 2016]. Высокая заболоченность бассейна Зейского водохранилища выделяет его среди водохранилищ Дальнего Востока и Сибири повышенным содержанием органического вещества [Арефина и др., 2010].

Таблица 2. Гидрологические условия в период работ на Зейском водохранилище в 2021 и 2022 гг.

Период экспедиции	17–23 сентября 2021 г.	26–31 июля 2022 г.
Уровень воды (У.В.), м абс.	318.01–317.89	311.65–311.69
У.В. среднееголетний за 2005–2020 гг. в календарный период экспедиции, м абс.	314.90–315.04	312.65–313.38
Общий расход, м ³ /с	3360–3276	713–726
Расход через водосброс, м ³ /с	2517–2238	0
Объем водохранилища, км ³	75.34–76.10	60.68–60.77
Объем притока к началу работ (с 20 апреля), км ³	42.0	10.5
Сброс воды через ГЭС к началу работ (с 20 апреля), км ³	23.4	6.3
Накопление притока в водохранилище к началу работ (с 20 апреля), км ³	18.6	4.2
Сработка через поверхностный водосброс к началу работ (с 20 апреля), км ³	8.6	0.0

В районе Зейского водохранилища климат ультраконтинентальный с муссонными чертами, зима суровая, малоснежная, лето умеренно прохладное (на севере) и теплое (на юге). Температура воздуха составляет: -4.6°C – в среднем за год, -31.0°C – в среднем за январь и 18.0°C – в среднем за июль по данным метеостанции Бомнак (Код WMO 31253). Через 0°C температура воздуха переходит в середине апреля и в середине октября. В теплый период года здесь выпадает большое количество осадков, возможны сильные ливневые дожди. Годовая норма осадков в среднем составляет ~ 573 мм, из них $\sim 85\%$ выпадает с середины апреля по середину октября [<http://aisori-m.meteo.ru/>].

В бассейне Зейского водохранилища распространены хвойная тайга и лесотундра, многолетнемерзлые породы и болота. На берегах водохранилища находится 6 населенных пунктов с населением около 4.5 тыс. человек, в нижнем бьефе расположен г. Зея с населением 22 тыс. чел. [Схема..., 2010].

ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ РАБОТ

Экспедиционные исследования на Зейском водохранилище были выполнены с 17 по 23 сентября 2021 г. и с 25 по 31 июля 2022 г. Гидрологические условия работ в 2021 и 2022 гг. значительно различались (табл. 2). В 2021 г. работы выполнялись в летне-осенний паводочный период. В течение теплого периода (май–начало сентября) наблюдались аномально высокие суммы осадков (до 850 мм), а суточная сумма составляла 50 мм. Погода непосредственно в период работ была ясная, без осадков, температура воздуха варьировалась от -2 до $+21^{\circ}\text{C}$, температура воды на поверхности: от $+9.6$ до $+15.1^{\circ}\text{C}$ (в нижнем бьефе $+8.4^{\circ}\text{C}$), ветер в период проведения работ был переменным до 6 м/с. Сработка водохранилища

происходила через турбины и поверхностные водосбросы.

Период экспедиционных работ в 2022 г. соответствовал стадии начала летнего наполнения водохранилища (начало паводочного периода). Погода в первой части этого периода характеризовалась антициклональным типом, во второй части – фронтальными осадками. Температура воздуха: от $+15.2$ до $+27.8^{\circ}\text{C}$, температура воды на поверхности: от $+11.6$ до $+26.7^{\circ}\text{C}$ (в нижнем бьефе $+4.7^{\circ}\text{C}$). Ветер в период проведения работ так же, как и в 2021 г. был переменным, до 6 м/с. Уровень воды был на 3.4 м ниже НПУ, сработка водохранилища происходила только через турбины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы полевых работ

Экспедиционные исследования на Зейском водохранилище включали в себя измерения гидрологических характеристик воды (температуры, электропроводности и содержания растворенного кислорода), отбор проб воды и воздуха для определения концентраций CH_4 и величин его потока на границе вода/атмосфера, а также отбор проб воды на химический состав (главные ионы, pH, минерализация, общее железо, кремний). Пространственное размещение станций наблюдений показано на рис. 1, сведения об объеме работ приведены в табл. 3. Все работы проводились с борта катера. В большинстве случаев постановка судна на якорь была невозможна из-за больших глубин и захламленности дна древесными остатками, поэтому измерения проводились в дрейфе.

Гидрологические характеристики измерялись с помощью зонда YSI 6600 на всех станциях (отбор проб воды на химический состав проводился не на всех станциях). Точность измерений температуры воды составила 0.05°C , электропроводности

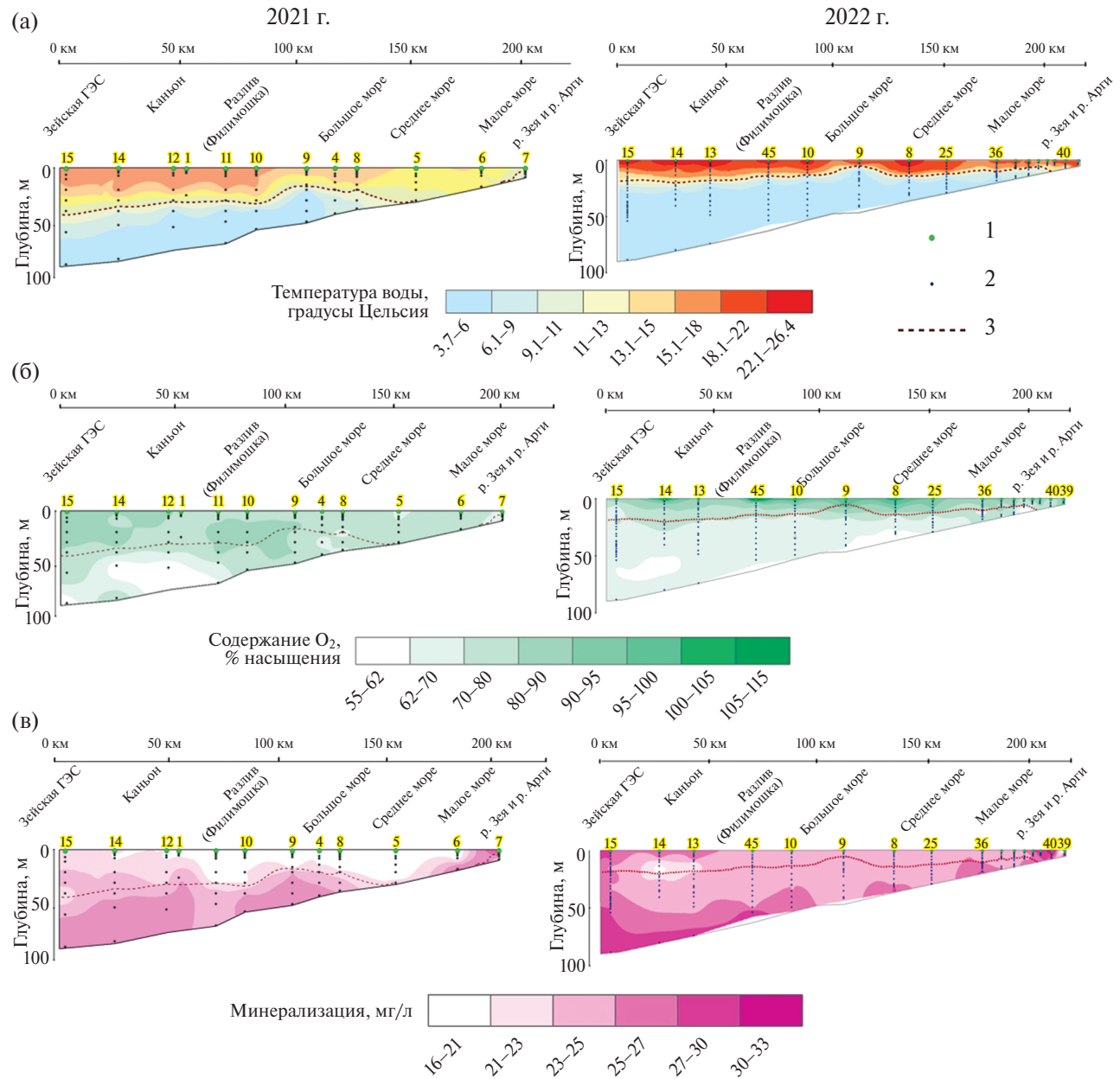


Рис. 2. Распределение температуры воды (а), содержания растворенного кислорода (б) и минерализации (в) по продольному профилю Зейского водохранилища по данным экспедиционных работ в сентябре 2021 г. (слева) и июле 2022 г. (справа). Обозначения: 1 – станции и их номера, 2 – точки измерения на вертикали, 3 – слой температурного скачка.

~3–5 мкСм/см. Пересчет электропроводности в минерализацию проводился для определения минерализации воды на всех станциях по уравнению связи, полученному на основе данных измерения минерализации в отдельных пробах воды в лабораторных условиях. Содержание кислорода измерялось мембранным датчиком. Его точность невысока, поэтому результаты этих измерений не следует рассматривать в строго количественном выражении, в рамках текущей работы достаточно было их интерпретировать на качественном

уровне (есть дефицит/нет дефицита кислорода). Дискретность зондирования по глубине составила от 1 до 5 м в зависимости от общей глубины на станции и характера наблюдаемых изменений гидрологических характеристик.

Пробы воды на CH₄ и химический состав отбирались батометром системы Нискина объемом 2 л с размеченным тросом (длина троса 100 м). Пробы на концентрацию CH₄ отбирались в двух повторностях во флаконы объемом 20 мл. Горизонты отбора проб назначались: осенью 2021 г. —

Таблица 3. Виды и объем полевых работ Зейском водохранилище в 2021 и 2022 гг.

Виды исследований		Период работ	
		сентябрь 2021 г.	июль 2022 г.
Измерение гидрологических характеристик (зондирование)	станций	19	21
Отбор проб воды на CH_4	станций	18	21
	всего проб*	80	150
Измерения потоков CH_4	станций	14	17
	всего проб**	116	127
Отбор проб воды на химический состав	станций	10	14
	всего проб	20	25

*включая повторности, ** включая пробы атмосферного воздуха (1 проба на 1 станцию)

в поверхностном слое, под слоем скачка температуры воды и в придонном слое; летом 2022 г. — в поверхностном слое, под фотическим слоем (5 м), над слоем скачка температуры и под ним (15 и 30 м, соответственно), а также в придонном слое (в 1 м выше дна). На некоторых станциях назначались дополнительные горизонты (например, на участках с апвеллингом, либо вблизи крупных притоков).

Измерения потоков CH_4 выполнены методом плавучих камер (2 камеры из пластика, объемом 7–10 л). Характеристики камер соответствуют методике ЮНЕСКО по измерению эмиссии CH_4 из водных объектов. Время экспонирования (1 час) разбивалось на две серии по 30–40 минут. Прокачка воздуха в трубке, идущей от камеры к шприцу-пробоотборнику, по 2 объема шприца (емкостью 60 мл) выполнялась перед каждым отбором.

Пробы воды на химический состав отбирались в емкости из химически неактивного пластика объемом 1,5 л и хранились при температуре от +8 до +15 °C в течение 3–8 дней до поступления в лабораторию. В этих пробах определялись главные ионы и по ним рассчитывалась минерализация воды. Затем по полученным данным строилась зависимость между минерализацией и измеренной электропроводностью воды. Во всех случаях связь тесная, очень близкая к линейной (коэффициент корреляции 0.95–0.98). Места и горизонты отбора проб назначались таким образом, чтобы в результате был охвачен весь диапазон минерализации, ожидаемой на водохранилище по сведениям из литературы.

Метеонаблюдения выполнялись с помощью портативной метеостанции Kestrel 5000 на каждой станции в начале цикла отбора проб и включали в себя измерение температуры и влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления.

Глубины на станциях измерялись с помощью эхолота. Местоположение станций определялось с помощью портативного GPS-приемника в системе координат WGS-84.

Методы лабораторных и камеральных работ

Определение химического состава вод Зейского водохранилища выполнено в ИВЭП ДВО РАН по методикам, описанным в нормативных документах [Руководящий документ..., 2009]. Содержание ионов натрия и калия определено на пламенном фотометре, ионов кальция и магния, гидрокарбонатного и хлоридного ионов — титрованием, сульфатного иона — на фотометре турбидиметрическим методом, цветность воды — на фотоколориметре.

Определение концентрации CH_4 в пробах воздуха и водной вытяжки выполнено в лаборатории ИФА РАН методом «headspace» [Bastviken et.al., 2010] на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2, согласно [РД 52.44.8162015].

Выброс CH_4 в результате дегазации воды при ее сбросах через Зейский гидроузел оценивался как произведение расхода воды и разницы концентрации CH_4 в воде между верхним и нижним бьефом (с учетом концентрации CH_4 в воздухе).

Методика расчета общей эмиссии метана

Расчет общей эмиссии CH_4 с поверхности Зейского водохранилища основан на результатах натурных измерений удельных потоков CH_4 и последующего их осреднения для выделенных районов (см. раздел Результаты) с учетом площадей, занятых мелководьями. Для этого авторами построена цифровая модель рельефа ложа Зейского водохранилища. Источниками топографической информации для данной модели послужили топографические карты масштаба 1:100000, на которых отражены точки высот, изогипсы в долине

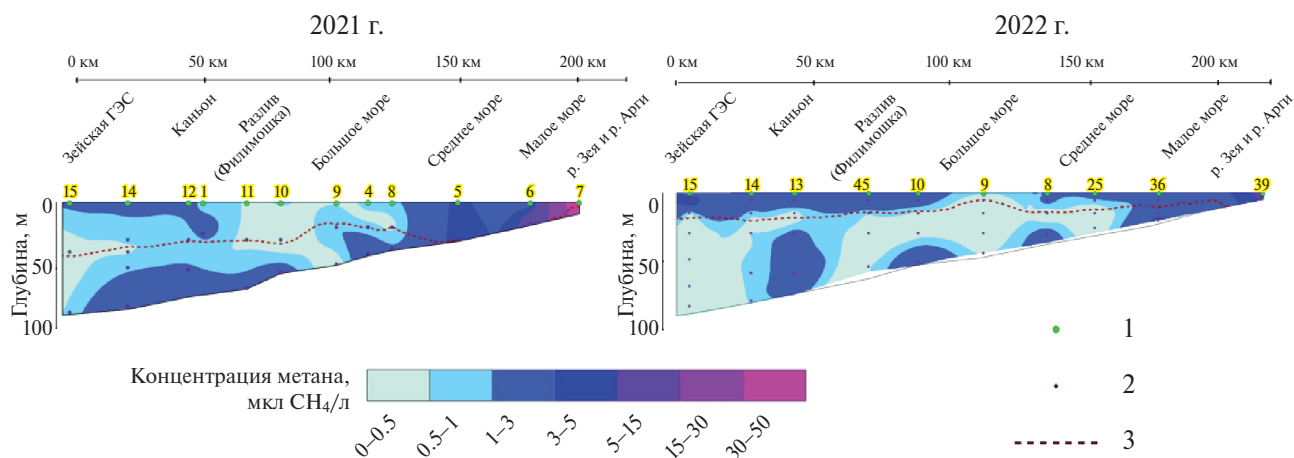


Рис. 3. Содержание CH_4 в воде по продольному профилю Зейского водохранилища по данным экспедиционных работ в сентябре 2021 г. (слева) и июле 2022 г. (справа). Обозначения: 1 — станции и их номера, 2 — точки измерения на вертикали, 3 — слой температурного скачка.

р. Зеи до затопления и изобаты в период не полного заполнения в конце 1970-х гг.; космические снимки Landsat и Sentinel-2 (с пространственным разрешением выбранных каналов 15 и 10 м соответственно) за период 2013–2020 гг., на которых читаются контуры акватории водохранилища при разных уровнях его наполнения (306–319 м. абс.); данные полевых измерений глубин водоема. Цифровая модель рельефа в абсолютных отметках построена методом Хатчинсона (метод *Toro to raster*) с помощью ГИС-пакета ESRI ARCGIS с пространственным разрешением 25 м.

Для перехода от дискретных в пространстве измерений на станциях к оценке общей эмиссии все водохранилище было разделено на районы, выделенные в рамках настоящего исследования (см. раздел Результаты). Исходя из густоты станций, количества опробованных горизонтов, связи потоков CH_4 с глубиной, а также фактического пространственного распределения удельных потоков CH_4 , внутри морфологических районов экспертно выделялись глубинные зоны. Это было сделано для максимально возможного точного расчета общей эмиссии метана. А именно, для того, чтобы разделить станции на мелководные и глубоководные, а затем рассчитывать осредненные потоки метана в пределах этих зон, опираясь на данные наблюдений на соответствующих станциях (отнесенным к глубоководной и мелководной зоне). Летом 2022 г. в Большом и Среднем море выделены зоны с глубиной менее 30 м, в пределах которых удельные потоки CH_4 были значительно выше, чем на остальной акватории. Отдельно учитывались локальные максимумы по-

токов CH_4 (так называемые «горячие точки» (*hot spots*) [Darling, Gooddy, 2006]), которые были обнаружены в осенней экспедиции 2021 г. в верхней части Каньона.

Общая эмиссия CH_4 приводится в форме диапазона. Нижняя «грубая» оценка заключалась в усреднении удельных потоков по всем станциям в пределах каждого района. Общая эмиссия CH_4 со всего водоема определялась суммированием эмиссий, которые получены перемножением средней удельной величины потока CH_4 , рассчитанной для каждого района, на площадь соответствующих районов. Верхняя «детализированная» оценка общей эмиссии CH_4 выполнялась с учетом участков акватории с глубиной менее 30 м, опираясь на доли площадей районов, занятых этими участками. Оценка эмиссии из участков «горячих точек» производилась путем экспертной оценки площади мелководных заливов, описываемых «горячими точками» (на уровне 3 и 5% площади для нижней и верхней оценки соответственно). Обе оценки содержат в себе также поток CH_4 , образующийся вследствие дегазации воды при ее сбросе через плотину Зейской ГЭС.

Вегетационный период в районе Зейского заповедника составляет 130–140 дней [<http://oort.info/zeysky/physgeo.html>]. Для расчета коэффициента эмиссии CH_4 взята средняя величина — 135 суток. Следует отметить, что в 2021 г. измерения проводились в конце вегетационного периода, в 2022 г. — ближе к его середине, поэтому результаты не в полной мере описывают весь вегетационный период.

Таблица 4. Средневзвешенная концентрация и запас метана в воде Зейского водохранилища

Даты (период экспедиции)	Уровень воды, м. абс.	Средневзвешенная концентрация CH_4 в воде, мкл/л	Объем водохранилища, км ³	Запас CH_4 , м ³
17–23 сентября 2021	318.01–317.89	1.34	75.4	101200
26–31 июля 2022	311.65–311.69	1.01	60.7	60700

Методика расчета запасов метана в водоеме

Для оценки запасов CH_4 в водоеме использовалось осреднение его концентраций путем нелинейной автоматизированной интерполяции по объему водохранилища для каждого узла сетки путём учёта значений окружающих точек станций. С использованием цифровой модели рельефа, полученной в настоящей работе, в каждом слое водоема с шагом 2 м по глубине производилась интерполяция по площади слоя значений концентрации метана методом ICW (Inverse Cost Weighting) [Wing et. al., 2004]. Данный метод является производным от стандартного метода IDW (Inverse Distance Weighted), однако позволяет корректно учитывать естественные барьеры (такие как мысы и полуострова, то есть точки станций могут не быть в прямой видимости друг от друга). В результате для каждого сезона получены вертикали с послойным распределением концентрации метана. Затем получен средневзвешенный по объему запас метана в водоеме, как сумма послойных произведений концентрации метана и объема каждого слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрологическая структура водоема в 2021 и 2022 гг.

В период экспедиции в сентябре 2021 г. температурная стратификация водохранилища и слой температурного скачка (СТС) были хорошо выражены, особенно в Большом море и в Каньоне, то есть там, где большие глубины. СТС залегал на глубинах ниже 20–30 м и, в целом, заглублялся по мере приближения к плотине. Глубина СТС менялась от 15–20 м на севере (в районе станции 6) до 30–40 м на юге Большого моря и до 60 м у плотины в районе станций 15–16 (рис. 2а). Средневзвешенная температура воды по профилю равнялась 9.4 °С. Самые низкие температуры у дна (4.9–5.5 °С) наблюдались в центре Большого моря (станции 9–10), самые высокие – в Среднем море (7–9 °С) (станции 5, 25) и Каньоне (6–7 °С) (станции 13–16). Водохранилище было насыщено кислородом по всей глубине, зон аноксии не выявлено. Средневзвешенная по продольному

профилю величина насыщения составляла 74%. Наименее насыщенные кислородом зоны выявлены в области наибольших глубин в Каньоне, при этом величина насыщения превышала 50% (рис. 2б). Средневзвешенная по профилю величина минерализации составляла 22.3 мг/дм³. Наибольшая минерализация воды наблюдалась в р. Зее (36.1 мг/дм³), ниже Бомнака минерализация менялась в пределах 26–29 мг/дм³ (станция 6). Минерализация слабо увеличивалась с глубиной (рис. 2в).

В 2022 г. в период экспедиции (26–31 июля) температурная стратификация водохранилища была также хорошо выражена, СТС располагался на глубинах 15–20 м и занимал относительно постоянное положение. Средневзвешенная температура воды по профилю составляла 8.5 °С. Самые низкие температуры были у дна (3.9–4.1 °С) – в Большом море и Каньоне (станции 9, 10, 13–16), самые высокие (до 5 °С) – в Малом и Среднем морях (25, 36, 37, 41), в заливах и реках. На поверхности температура воды достигала 26 °С (см. рис. 2а). Также высокая температура была в реках Зее и Арги во время дождевого паводка – до 23 °С. Водная толща водохранилища была насыщена кислородом по всей глубине, зон аноксии не выявлено. Средневзвешенная величина насыщения O_2 по продольному профилю составляла 71%. Наименее насыщенные O_2 зоны были выявлены в области наибольших глубин в Каньоне, а также в Среднем море в придонном слое, при этом величины насыщения превышали 55%. Максимальная концентрация растворенного кислорода (до 115% насыщения) зафиксирована в поверхностном слое воды в Большом море (станции 9, 10) (см. рис. 2б), минимальная – в придонном слое воды в Малом море (станции 7, 37) (около 50%). Река Арги в период начала дождевого паводка была насыщена кислородом до 100%, что может быть связано как с поступлением аэрированных дождевых вод непосредственно в водоток, так и с фотосинтетической активностью фитопланктона в водах реки. Максимальные значения минерализации, как и ранее, отмечались в воде устьев рек Зее и Арги

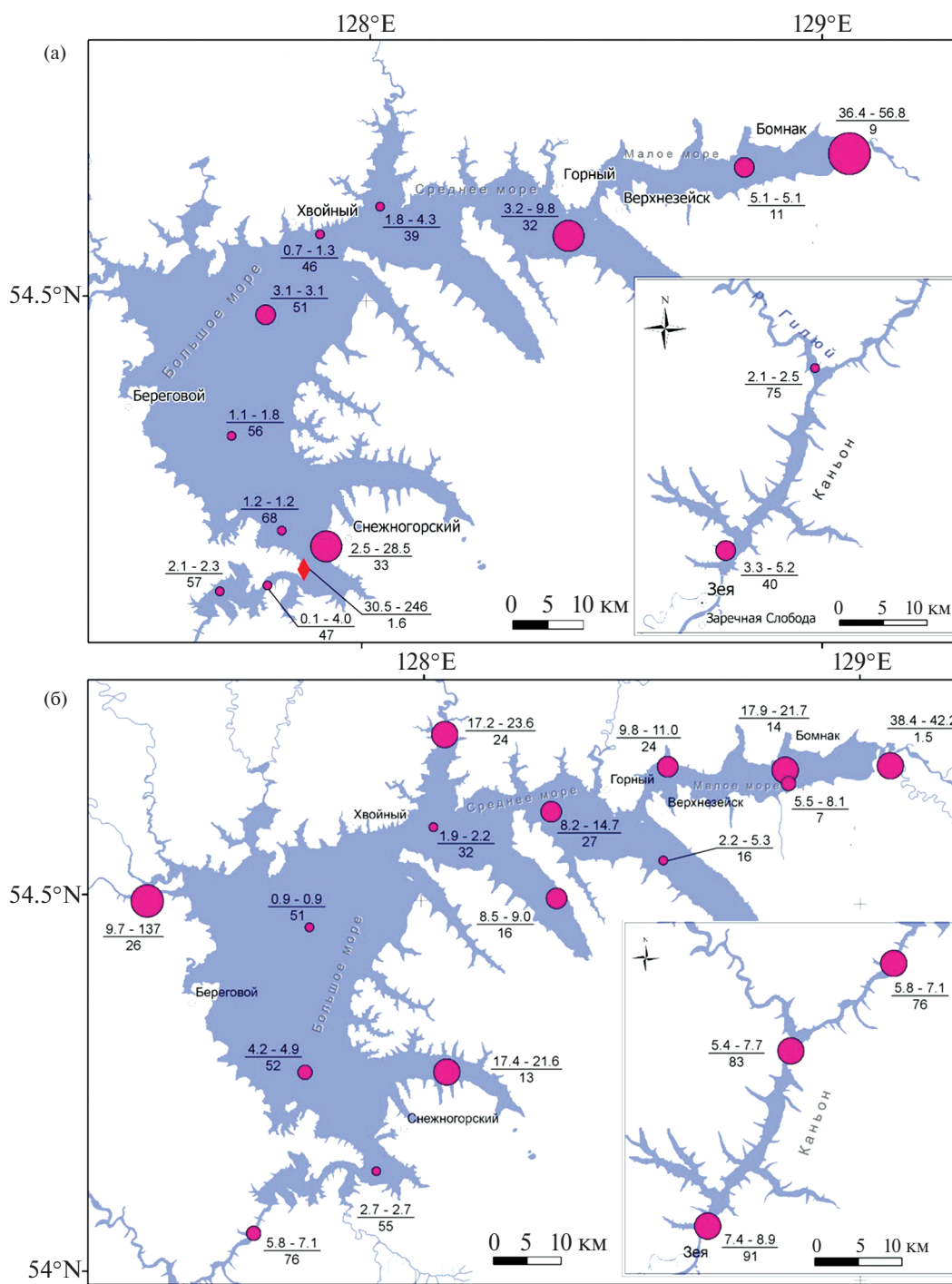


Рис. 4. Удельные потоки метана с поверхности Зейского водохранилища в сентябре 2021 г. (а) и июле 2022 г. (б). В числителе приведен диапазон измеренных потоков ($\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{сут}$), в знаменателе — глубина водохранилища на станции (м). Красным ромбом обозначено местоположение «горячей точки» в 2021 г.

(32.7 и 42.8 mg/dm^3). Также высокая минерализация наблюдалась в придонном слое в Каньоне (до 30–33 mg/dm^3) и по всей водной толще в Малом море (около 30 mg/dm^3). (см. рис. 2в). Наименьшая минерализация наблюдалась на границе Каньона и Большого моря, а также в Среднем море (вдали от устьев рек).

Содержание метана в воде

Осенью 2021 г. средневзвешенная концентрация CH_4 в воде составила 1.34 мкл/л. Повышенные концентрации наблюдались в Малом море (станция 6) (от 3–5 до 30 мкл/л) и особенно в зоне выклинивания подпора — в зоне впадения р. Арги (до 49 мкл/л). Пониженные концентрации (менее

Таблица 5. Характеристика районов Зейского водохранилища

Номер района	Название района	Характеристика
1	Каньон — приплотинная часть (ниже Гилуйского залива)	Наиболее глубокая часть водохранилища (до 95 м). Формирование ВМ обусловлено соединением водохранилищной и Гилуйской водных масс. Ветровое перемешивание значительно слабее, чем в Большом море. Берега скалистые.
2	Каньон — верхняя часть (выше Гилуйского залива)	Глубоководная часть водохранилища (до 86 м). Преобладает водохранилищная ВМ. Ветровое перемешивание значительно слабее, чем в Большом море. Берега скалистые.
3	Гилуйский залив	Залив в долине р. Гилуй (глубина до 86 м). Выделяется Гилуйская ВМ, обусловленная значительным речным притоком. Вода имеет повышенную минерализацию. Ветровое перемешивание значительно слабее, чем в Большом море. Зимой ледяной покров не везде однородный — наблюдаются полыньи и каверны.
4	Большое море	Относительно глубоководная часть водохранилища (глубины от 30–40 до 50–60 м). Русло р. Зеи под водой практически не выражено. Ветровое перемешивание затрагивает только верхние горизонты, глубина слоя температурного скачка не одинакова по площади. На глубинах ниже 30 м преобладает зимняя водохранилищная ВМ. Широкие осушки при низком уровне воды на участках абразионно-аккумулятивных берегов.
5	Среднее море	Относительно мелководная часть водохранилища (глубины до 30–35 м). Русло р. Зеи под водой выражено слабо. Ветровое перемешивание затрагивает только верхние горизонты.
6	Мелководные заливы с крупными притоками	Мелководные участки водохранилища (менее 20 м при НПУ). Заливы, в которые впадают относительно крупные притоки (Брянта-Унаха- Утугай, Темна, Урган, Мульмуга). Летом наблюдается повышенная минерализация у дна, температура воды у дна более 5 °С. Ветровое перемешивание затрагивает значительную часть толщи воды. Берега низкие, часто заболоченные.
7	Малое море	Мелководная часть водохранилища (глубины до 20 м), русло узкое, старая долина под водой хорошо выражена, на мелководьях стволы деревьев над водой. Сильное влияние бокового притока и р. Зеи на распределение температуры, кислорода и особенно метана, сгонно-нагонные нарушения температурной стратификации по всей толще. Особенно сильно влияние р. Арги, выраженное в повышенных концентрациях CH_4 во всей толще.

3 мкл/л) выявлены в Каньоне (станции 13–16). Минимальные концентрации CH_4 в воде наблюдались в Большом море (станции 9, 10) и вблизи плотины (станции 15–16) (менее 1 мкл/л) (рис. 3). В сентябре 2021 г. в верховьях водохранилища концентрации CH_4 в воде были на порядок больше, чем в июле 2022 г., когда объем притока речных вод был значительно ниже.

Летом 2022 г. средневзвешенная концентрация CH_4 в воде составила 1.01 мкл/л. Максимальные его концентрации установлены в р. Зеи и р. Арги (соответственно 5.3 мкл/л и 12.5 мкл/л). Повышенные значения (до 3–5 мкл/л) выявлены в верхней части Малого моря. Пониженные значения CH_4 (0.1–1.0 мкл/л) — в Каньоне и в центре основной акватории (станции 9, 10). Минимальные концентрации CH_4 (порядка 0.10–0.15 мкл/л) отмечены у плотины на глубинах 30–70 м (см. рис. 3). В заливах в целом концентрация CH_4 в воде выше, чем на глубоких станциях.

В 2021 г. запас метана в воде Зейского водохранилища был значительно больше, чем в 2022 г. Различие в запасах метана было приблизительно

пропорциональным объему водохранилища на момент проведения работ (табл. 4).

Удельный поток с акватории и выброс метана при дегазации на плотине ГЭС

В период экспедиционных исследований в сентябре 2021 г. концентрации CH_4 в воздухе над акваторией водохранилища варьировались в пределах 1.8–2.8 ppm. На открытой акватории удельный поток CH_4 изменялся в диапазоне 0.7–5.1 мг CH_4 /м²/сут (рис. 4а). Существенно более высокие значения удельного потока CH_4 выявлены в устье р. Арги (36–57 мг CH_4 /м²/сут) и в мелководном заливе («горячая точка») на границе Большого моря и Каньона (станция 2) (31–246 мг CH_4 /м²/сут). Большой разброс значений удельного потока (на порядок), вероятно, связан с его интенсивным переносом в составе газовых пузырей, выделяющихся из донных отложений.

В период исследований в июле 2022 г. концентрации CH_4 в воздухе составляли 2–3 ppm. Удельный поток CH_4 варьировался в пределах 0.9–42 мг CH_4 /м²/сут с отдельным выпадающим измеренным максимумом 137 мг CH_4 /м²/сут в р. Унаха

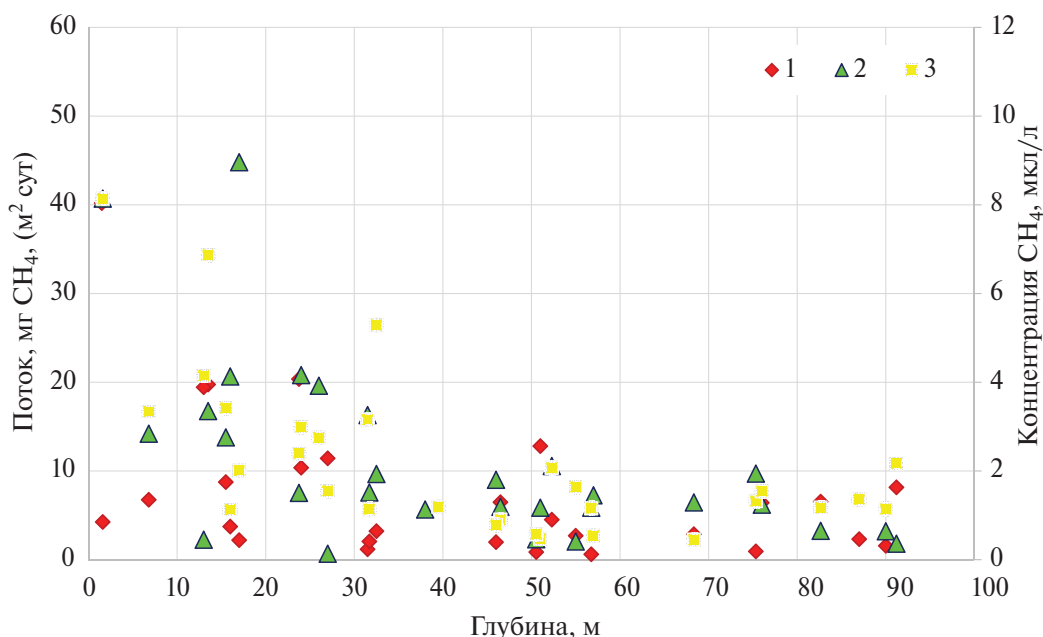


Рис. 5. Изменение удельного потока метана в атмосферу и его концентраций в воде Зейского водохранилища с глубиной станции в теплый период по объединенным данным съемок в 2021 г. и 2022 г.: 1 — удельный поток метана, 2 и 3 — соответственно содержание метана в придонном и поверхностном слоях воды.

(рис. 4б). По сравнению с осенью 2021 г. значения потока метана в Большом море отличались не значительно. В Каньоне в июле 2022 г. удельный поток CH_4 был в 2–3 раза больше ($5\text{--}9 \text{ мг}\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$), чем в 2021 г.; в Малом море — заметно больше. В устье р. Арги в июле 2022 г. наблюдались сопоставимые с сентябрем 2021 г. величины удельного потока метана. Благодаря увеличению количества станций наблюдения в заливах в 2022 г., получены дополнительные сведения о пространственном распределении значений удельного потока CH_4 . Максимальные его потоки выявлены в устье р. Арги, в отдельных заливах и Малом море, минимальные — над руслом в Большом море и Каньоне.

Выявлена общая тенденция обратной связи концентраций CH_4 с глубиной станций. Эта связь имеет общий вид, близкий к степенной зависимости (рис. 5), однако велика изменчивость тесноты этой связи во времени (в 2021 г. связь теснее, чем в 2022 г.). Эту связь нельзя рассматривать, как расчетное уравнение ($R^2 \sim 0.4$), а только как иллюстрацию закономерности и как ориентир для выявления условий наиболее сильной неопределенности этой связи. Наибольший разброс потока и концентраций CH_4 наблюдаются при глубинах станций 10–30 м. Наиболее устойчивые низкие потоки наблюдаются на участках с глубинами более 30 м.

Осенью 2021 г. в условиях работы поверхностного водосброса выброс CH_4 при дегазации составил $175 \text{ кг}\text{CH}_4/\text{сут}$ (менее 0.1% от общей эмиссии). В день отбора проб в верхнем и нижнем бьефе ГЭС содержание CH_4 в верхнем бьефе на горизонте водозабора турбин было $0.25 \text{ мг}/\text{м}^3$, на горизонте водосброса $0.96 \text{ мг}/\text{м}^3$, в нижнем бьефе $0.12 \text{ мг}/\text{м}^3$. Расход воды через турбины был $1038 \text{ м}^3/\text{с}$, через водосброс $2238 \text{ м}^3/\text{с}$ [<http://www.rushydro.ru/>].

В теплый период 2022 г. поверхностный водосброс на плотине не использовался — не было необходимости в холостых сбросах из-за низкого притока. В день отбора проб в верхнем и нижнем бьефе ГЭС содержание CH_4 в верхнем и нижнем бьефе было приблизительно одинаковым на уровне $0.1\text{--}0.15 \text{ мг}/\text{м}^3$, эта величина сопоставима с точностью измерения концентрации CH_4 в воде. Расход воды через турбины был $726 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, принято, что в период работ в 2022 г. выброс CH_4 при сбросе воды через плотину в нижний бьеф не происходил.

Районирование акватории

Существует морфологическое районирование Зейского водохранилища, согласно которому водоем по его длине разделен на 8 районов [Шестеркин, 2015].

В рамках настоящей работы на акватории Зейского водохранилища авторами выделено 7 районов. Эти районы выделены экспертно, опираясь

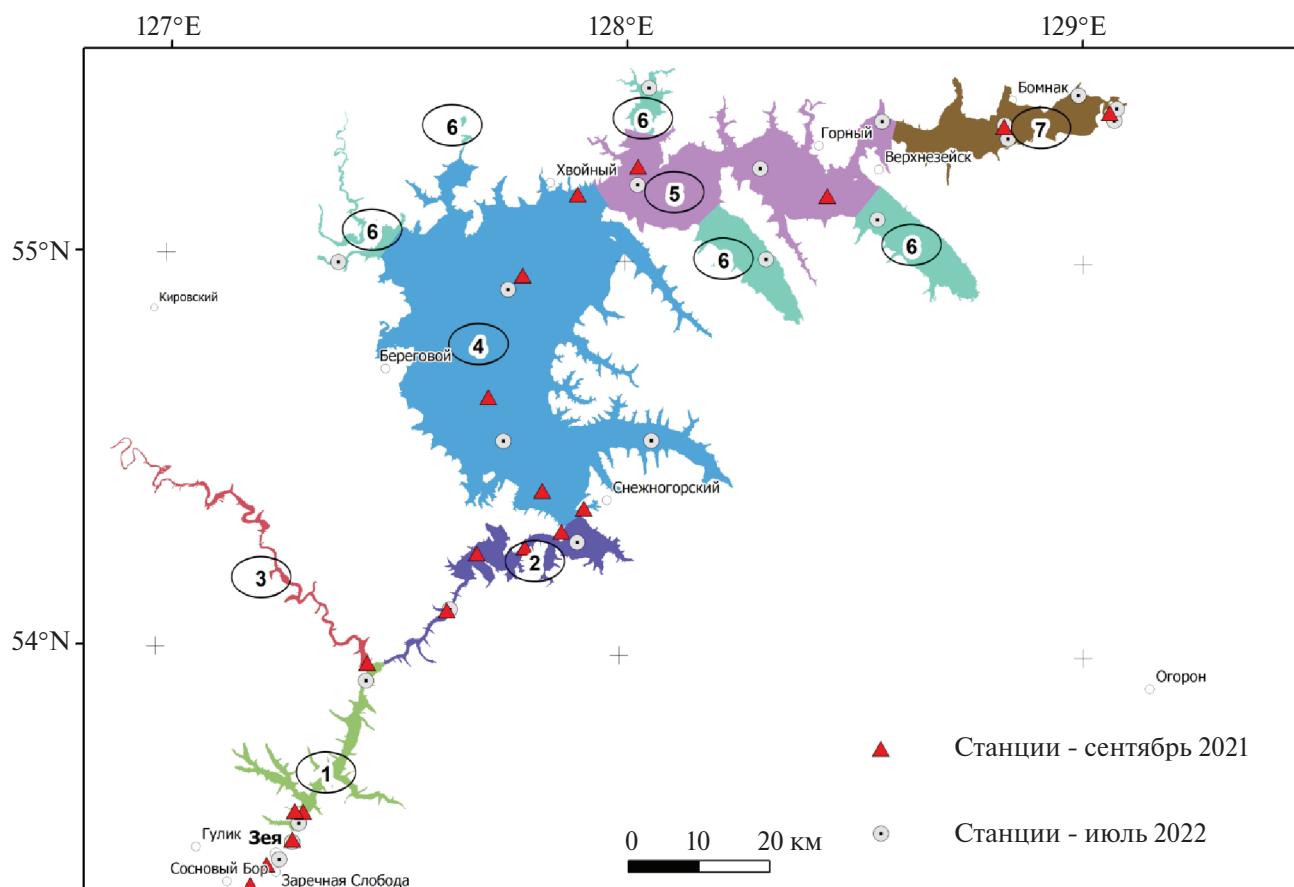


Рис. 6. Схема районирования акватории Зейского водохранилища (нумерация и названия районов соответствуют таблице 5).

на материалы полевых работ теплого периода 2021 и 2022 гг., а также на результаты работ, выполненных в марте 2022 г. [Терский и др. 2023]. При проведении районирования учитывались следующие показатели: преобладание выраженной водной массы (ВМ); пространственная обособленность; наличие значительных притоков; величина, диапазон, характер изменения содержания и потоков CH_4 , выявленные в ходе экспедиций 2021–2022 гг. Характеристика районов приведена в табл. 5, схема районирования – на рис. 6.

Эмиссия метана с поверхности Зейского водохранилища

Значения удельного потока CH_4 осенью 2021 г. (табл. 6) был заметно ниже, чем летом 2022 г. (табл. 7). Коэффициент эмиссии CH_4 за вегетационный период составил 8.6–11.1 кг CH_4 га/год и 13.2–17.4 кг CH_4 га/год в 2021 и 2022 гг. соответственно. Наименьший вклад в эмиссию CH_4 дает глубоководная узкая приплотинная часть Каньона, а наибольший – обширное Большое море, особенно в условиях небольшого притока речных вод в маловодный теплый период 2022 г. Отдель-

ные «горячие точки», несмотря на их малую площадь, могут также давать весомый вклад в общую эмиссию метана. Оценка этого вклада очень сильно зависит от способа их учета при расчете общей эмиссии. Для нижней оценки «горячие точки» и станции на мелководьях учитывались с тем же весом, что и остальные станции в пределах района. Для верхней оценки были рассчитаны площади мелководий (до 30 м), которые использовались в качестве весовых коэффициентов при учете мелководных станций в пределах районов.

ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с работой [Эдельштейн и др., 1984] в Зейском водохранилище в теплый период года выделялись три основные водные массы (ВМ): Зейская речная, Гилюйская речная, Водохранилищная в различных сезонных модификациях. Речные ВМ присутствовали в основном в непосредственной близости от устьев соответствующих рек. Гилюйская ВМ также обнаруживалась в Каньоне вблизи Гилюйского залива. Само водохранилище в основном было заполнено во-

Таблица 6. Общая эмиссия и коэффициент эмиссии CH₄ с поверхности Зейского водохранилища осенью 2021 г.

Район	Номер района (см. рис. 6)	17–23 сентября 2021				
		Площадь района, км ²	Средний (удельный) поток, мгCH ₄ /м ² /сут	Диапазон измеренных потоков, мгCH ₄ /м ² /сут	Общая эмиссия метана, тCH ₄ /сут	Коэффициент эмиссии, кг CH ₄ га/год (135 сут)
Приплотинная часть Каньона	1	73.4	3.3	2.1–5.2	0.2	4.4
Верхняя часть Каньона	2	115.5	2.2–45*	0.1–246*	0.2–5.2	2.8–62
Гиллойский залив	3	36.8	2.3	0.7–3.9	0.1	3.1
Большое море	4	1296	3.9	0.7–4.6	5.1	5.3
Среднее море	5	444	4.8	1.8–9.8	2.1	6.4
Заливы	6	437	6.5–13	3.2–29	2.8–5.7	8.8–17
Малое море	7	218	11–26	0.7–56	2.5–5.6	15–35
“Горячая точка” (3–5% от района 2)	-	-	138	30.5–246	0.48–0.8	-
Выброс на плотине	-	-	-	-	0.175	-
ВСЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ		2621	6.4–8.3	0.7–246	16.7–21.7	8.6 – 11.1

* верхняя граница диапазона измеренного и среднего удельного потока для данного района указана для сценария, при котором «горячая точка» учтена в качестве одной из станций района

Таблица 7. Общая эмиссия и коэффициент эмиссии CH₄ с поверхности Зейского водохранилища летом 2022 г.

Район	Номер района (см. рис. 6)	26–31 июля 2022				
		Площадь района, км ²	Средний (удельный) поток, мгCH ₄ /м ² /сут	Диапазон измеренных потоков, мгCH ₄ /м ² /сут	Общая эмиссия метана, тCH ₄ /сут	Коэффициент эмиссии, кг CH ₄ га/год (135 сут)
Приплотинная часть Каньона	1	63.4	7.4–9.8	7.2–12	0.5–0.6	10–13
Верхняя часть Каньона	2	106	4.6–6.1	3.6–9.3	0.5–0.6	6.1–8.2
Гиллойский залив	3	30.7	8.7	7.2–10.2	0.3	12
Большое море	4	1213	6.2–9.1	1.2–28.7	7.5–11	8.4–12
Среднее море	5	408	7.9–9	2.5–19.6	3.2–3.7	11–12
Заливы	6	315	27–35	2.2–137	8.4–11	36–48
Малое море	7	151	13–16	2.9–42	2.0–2.4	18–22
Выброс на плотине	-	-	-	-	0	-
ВСЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ		2287	9.8–13	1.2–137	22.4–29.8	13.2–17.4

дохранилищной ВМ в следующих модификациях: зимняя придонная, летняя центрального района (мы этот район называем «Большим морем»), летняя нижнего района.

В теплый период 2021 и 2022 гг. нами выделено четыре ВМ, которые были характерны для Зейского водохранилища уже в первые годы после его наполнения (Эдельштейн и др., 1984). Зимняя водохранилищная ВМ, расположенная в придонном слое воды в Каньоне и Большом море ниже 20–40 м, характеризуется относительно высокой минерализацией (до 45 мг/л), очень низкой температурой воды (около 4–6 °С) и однородным содержанием кислорода на уровне 50–60% (которое было характерно для зимы 2022 г, когда авторами также выполнялись экспедиционные исследования). Гиллойская ВМ,

примыкающая к нижней части Каньона, в слое 10–25 м, характеризуется более низкой минерализацией (около 25–30 мг/л) и повышенным содержанием кислорода (до 100–105% летом 2022 г.). Летняя водохранилищная ВМ, расположенная в верхнем слое водной толщи (до 10–15 м от поверхности), распространена в Каньоне, Большом и Среднем море. Речная ВМ, в основном Зейская, заполняет, главным образом, верховья водоема и Малое море. Не только сток р. Зей, но также ветер и остальные притоки, приводят к неоднородности распределения характеристик по глубине.

Сгонно-нагонные явления, как и ветровое перемешивание, являются существенным фактором аэрации воды на глубинах ниже СТС и окисления CH₄ в воде широкой части акватории. В Каньоне

влияния сгонно-нагонных явлений не выявлено. Вследствие высокой частоты сильных ветров в летне-осенний период характер температурной стратификации Зейского водохранилища неоднороден по площади акватории. Зоны апвеллинга были выявлены в ходе экспедиционных наблюдений в Большом море в 2021 г. и в Малом море в 2022 г. Скорее всего, пространственная неоднородность в Большом море в целом характерна для осени. Возможно, что сгон поверхностной ВМ и апвеллинг придонной ВМ — это один из главных механизмов перемешивания придонной воды в Зейском водохранилище. Несмотря на то, что апвеллинг — явление, характерное в большей степени для морей и океанов, это нередкость и для больших озер и водохранилищ [Экосистема Онежского озера..., 1990].

В ходе полевых работ в 2022 г после ночного обильного дождя на берегу был обнаружен ручей (далее, ручей Зимовье), вытекающий из болотного массива и впадающий в Малое море Зейского водохранилища. Предположительно, ручей течет по кровле многолетнемерзлых пород. Температура воды в ручье составляла 6.0°C. Его химический состав отличался очень высокой цветностью, содержанием железа и органического вещества, более низким показателем рН, низкой минерализацией, но очень высоким содержанием органического углерода (ОУ). Склоновый сток с болотных массивов на многолетнемерзлых породах, по-видимому, сам по себе не приносит CH_4 в водоем, но может приносить большое количество органического вещества, которое, осаждаясь, способствует продуцированию CH_4 в донных отложениях. В пользу гипотезы мерзлотного происхождения ручья Зимовье свидетельствуют и сведения о талых мерзлотных водах, приведенные в литературных источниках. Так, экспедиционные исследования в 2020 г. в верховьях р. Бурей [Tashiro et. al., 2020] показали, что в сезон таяния снега в переувлажненных поверхностных почвах образуется большое количество растворенного ОУ вместе с растворенным железом (Fe), что приводит к значительному транспорту Fe и ОУ. Летние дожди не только увеличивают концентрацию Fe и ОУ в реках, но и способствуют накоплению Fe в почвах на многолетнемерзлых породах в пределах водно-болотных угодий. В обследованном ручье содержание CH_4 в воде было очень низким — 0.09 мкл/л.

Выброс CH_4 при сбросе воды в нижний бьеф может вносить большой вклад в общее поступление CH_4 в атмосферу из водохранилищ. Согласно исследованиям амазонских водохранилищ, около 70% CH_4 диффундирует в атмосферу при сбросе вод через плотину в нижний бьеф [Kemenes, 2016]. На плотине Зейской ГЭС в отсутствие сработки через поверхностные водосбросы в 2022 г. выброс CH_4 в атмосферу не выявлен, а осенью 2021 г., когда был сброс вод через плотину в нижний бьеф, выброс метана в атмосферу составлял 175 кг CH_4 /сут или 0.09% от общей эмиссии CH_4 за теплый период. При этом, зимой 2022 г. поток составил 27.4 кг CH_4 /сут, даже в отсутствие работы поверхностных водосбросов [Терский и др., 2023], и, по-видимому, являлся единственным источником выброса CH_4 в период ледостава.

Основной автохтонный источник CH_4 в Зейском водохранилище — донные отложения мелководной части акватории, поскольку прослеживается закономерность уменьшения потоков метана от берегов к центру водоема. Мелководные заливы, дно которых покрыто регулярно поступающим древесным материалом с берегов (такой вывод сделан по наличию органической взвеси и древесных остатков на дне таких заливов), распространены на отдельных участках береговой линии, и, по-видимому, не являются площадным источником CH_4 , а скорее точечным в масштабе всего водоема. Несмотря на повышенные на несколько порядков потоки CH_4 в таких заливах, его концентрации в воде вблизи берегов всего на несколько мкл/л выше фоновых.

Главный аллохтонный источник CH_4 — это р. Арги — крупный болотный приток водохранилища в его верховьях. В результате всех экспедиционных исследований, в том числе зимних работ в марте 2022 г. [Терский и др., 2023], выявлено, что р. Арги — один из крупных притоков Зейского водохранилища, дренирующего обширный болотный массив, является значимым источником поступления CH_4 и органического вещества в водоем. Это относительно большая река ($F=7090 \text{ км}^2$, $L=350 \text{ км}$), сопоставимая с самой Зеей, составляет примерно 9% от всей площади водосбора Зейского водохранилища в верховьях. Вода р. Арги при впадении в водохранилище насыщена сероводородом и CH_4 , имеет высокую минерализацию и цветность, низкое содержание кремния и кислорода.

Оценки удельных потоков CH_4 (0.1–56 $\text{мгCH}_4/\text{м}^2\text{сут}$), полученные авторами в ходе описываемых в настоящей статье экспедиционных исследований в Зейском водохранилище, в целом согласуются с мировыми данными. В работе [Varis et. al., 2012] для водохранилищ бореальной зоны приведен диапазон эмиссии CH_4 , составляющий 1–100 $\text{мгCH}_4/\text{м}^2\text{сут}$. В Зейском водохранилище авторами выявлены зоны как с очень небольшим потоком CH_4 , так и отдельные «горячие точки» с величиной потока, превышающей верхнюю границу этой оценки.

Коэффициенты эмиссии CH_4 из Зейского водохранилища в 2021 и 2022 гг. (8.6–17.4 $\text{кг CH}_4/\text{га}$) соответствуют коэффициентам, представленным в дополнениях к руководящим принципам МГЭИК 2019 г., которые были сформированы более 20 лет назад [<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>]. Представленный МГЭИК 2019 для водохранилищ бореальной зоны коэффициент составляет 13.6 $\text{кг CH}_4/\text{га}$ (с пределами 95% доверительного интервала среднего значения 7.3–19.9 $\text{кг CH}_4/\text{га}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования впервые на Зейском водохранилище выполнены натурные измерения концентрации CH_4 в воде и его удельных потоков с водной поверхности вместе с гидролого-гидрохимической съемкой в теплые периоды относительно многоводного 2021 г. и маловодного 2022 г. По сравнению с сентябрем 2021 г., в июле 2022 г. запас теплоты в Зейском водохранилище был значительно меньше, несмотря на более высокую температуру поверхностного слоя воды. Минерализация была выше, а содержание кислорода в среднем практически одинаково.

Содержание CH_4 в воде и его удельные потоки уменьшаются от берегов и заливов к центру водохранилища. По-видимому, основными источниками органического вещества и метана являются заболоченные притоки, а также прибрежные участки акватории, куда поступает сток органического вещества с берегов. Общая эмиссия CH_4 с поверхности Зейского водохранилища значительно выше в летний период 2022 г., когда наблюдается максимальный прогрев мелководий, даже несмотря на меньшую площадь акватории, чем осенью 2021 г. Согласно проведенным авто-

рами оценкам, общая эмиссия CH_4 с водной поверхности Зейского водохранилища в осенний период 2021 г. составила 16.7–21.7 $\text{тCH}_4/\text{сут}$, в летний период 2022 г. – 22.4–29.8 $\text{тCH}_4/\text{сутки}$.

Выброс метана во время сработки воды через сооружения гидроузла в теплый период связан с режимом работы поверхностных водосбросов. В отсутствие работы поверхностного водосброса летом 2022 г. выброса метана не происходило. Осенью 2021 г., несмотря на наличие поверхностного водосброса, выброс CH_4 был незначительным (0.175 $\text{тCH}_4/\text{сут}$), составляя около 0.09% от общей его эмиссии с водной поверхности Зейского водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 413 с.
- Арефина Т. И., Бородинская Г. В., Бульон В. В. и др. Гидроэкологический мониторинг зоны влияния Зейского гидроузла. Хабаровск: ДВО РАН, 2010. 354 с.
- Гарькуша Д. Н., Фёдоров Ю. А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2021. 366 с.
- Гречушников М. Г., Репина И. А., Степаненко В. М., Казанцев В. С., Артамонов А. Ю., Варенцов М. И., Ломова Д. В., Мольков А. А., Капустин И. А. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Известия Русского географического общества. 2018. Т. 150.5. С. 14–33.
- Гречушников М. Г., Репина И. А., Степаненко В. М., Казанцев В. С., Артамонов А. Ю., Ломов В. А. Эмиссия метана с поверхности долинного Можайского водохранилища // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85.
- Елистратов В. В., Масликов В. И., Сидоренко Г. И., Молодцов Д. В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
- Правила использования водных ресурсов Зейского водохранилища на р. Зее (утверждены приказом Федерального агентства водных ресурсов от 18 июля 2018 г. N151) [Электронный ресурс]. 2018.
- Руководящий документ. Массовая концентрация метана и диоксида углерода в приземном слое атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии РД 52.44.816–2015.
- Руководящий документ. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды РД 52.18.595–96 (в ред. Изменения № 1, утв. Росгидрометом 11.10.2002, Изменения № 2, утв. Росгидрометом 28.10.2009).

- Репина И. А., Терский П. Н., Горин С. Л., Агафонова С. А., Ахмерова Н. Д., Василенко А. Н., Гречушникова М. Г., Григорьев В. Ю., Казанцев В. С., Лисина А. А., Ломов В. А., Мишин Д. В., Сазонов А. А., Степаненко В. М., Соколов Д. И., Тимошенко А. А., Фролова Н. Л., 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.
- Схема комплексного использования и охраны водных объектов по бассейну реки Амур (российская часть). Проект. Книга 1. Владивосток: ДальНИИВХ, 2010. 175 с.
- Терский П. Н., Горин С. Л., Гречушникова М. Г., Агафонова С. А., Репина И. А. Гидрологические условия эмиссии метана из Зейского водохранилища в теплый и холодный период 2021–2022 гг. // GREG 2022: Международная научно-исследовательская конференция. «Эмиссия парниковых газов сегодня и в геологическом прошлом: источники, влияние на климат и окружающую среду». Сборник тезисов. Казань: Казан. фед. ун-т, 2023. С. 46.
- Шестеркин В. П. Солевой состав вод Зейского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 5. 2015. С. 32–42.
- Шестеркин В. П., Сиротский С. Е., Шестеркина Н. М. Микроэлементы в водах Зейского водохранилища // Жизнь пресных вод. Владивосток: БПИ ДВО РАН. 2016. С. 47–53.
- Эдельштейн К. К., Ершова М. Г., Немальцев А. С. Гидрологические особенности Зейского водохранилища в период его заполнения // Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск: Наука, 1984. С. 146–156.
- Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.
- Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H., Pinho L. Q., Calheiros D. F., Crill P. Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling // Environ. Sci. Technol. 2010. V. 44. № 14. P. 5450–5455.
- Darlin, W. G. The hydrogeochemistry of methane: Evidence from English groundwaters [Text] / W. G. Darling, D. C. Gooddy // Chemical Geology. 2006. V. 229. Issue 4. P. 293–312
- Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., Beaulieu J. J., DelSontro T., Barros N., Bezerra-Neto J. F., Powers S. M., Dos Santos M. A., Vonk, J. A. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis // BioScience. 2016. V. 66. № 11. P. 949–964.
- Deemer B. R., Holgerson M. A. Drivers of methane flux differ between lakes and reservoirs, complicating global upscaling efforts // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. V. 126. № 4. P. e2019JG005600.
- Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curua-Una) in the Amazon basin // Inland Waters. 2016. V. 6. P. 1–8.
- Tashiro Y., Yoh M., Shiraiwa T., Onishi T., Shesterkin V., Kim V. Seasonal Variations of Dissolved Iron Concentration in Active Layer and Rivers in Permafrost Areas, Russian Far East // Water. 2020. V. 12. № 9. P. 2579.
- Varis O., Kummu M., Härkönen S., Huttunen J. T. “Greenhouse gas emissions from reservoirs.” Impacts of large dams: a global assessment. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. 69–94.
- Wing S. R., Bowman M. H., Smith F., Rutger S. M. Analysis of biodiversity patterns and management decision making processes to support stewardship of marine resources and biodiversity in Fiordland—a case study // Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand. 2004.
- <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- <http://aisori-m.meteo.ru/>
- <http://oopt.info/zevsky/phvsgeo.html>
- <http://www.rushydro.ru/>

METHANE EMISSIONS AND HYDROLOGICAL STRUCTURE OF ZEYA RESERVOIR (RUSSIA) IN WARM PERIOD

P. N. Terskii^{1,5,*}, S. L. Gorin^{1,4}, I. A. Repina^{1,2}, S. A. Agafonova^{1,3}, M. V. Zimin³, V. P. Shesterkin⁶,
F. A. Shchekotikhin³

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Research Computing Centre, Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 1, p. 4, Moscow, 119234 Russia*

³*Faculty of Geography, Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

⁴*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Verkhnyaya Krasnosel'skaya 17,
Moscow, 105187 Russia*

⁵*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Gubkina street 3, Moscow, 119333 Russia*

⁶*Institute of Water and Environmental Problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Dikopoltseva street 56, Khabarovsk, 680000 Russia*

*e-mail: pavel_tersky@mail.ru

Estimates of methane emissions in the warm season from the Zeya reservoir, one of the biggest hydropower facilities that affects Russia's carbon balance, were obtained for the first time based on the field measurements of methane concentrations in water and methane fluxes from the water surface. During expeditionary investigations conducted in September 2021 and July 2022, field data were collected. It was feasible to create the aquatory zoning and learn more about the water body's thermal, oxygen, and chemical structure based on hydrological and chemical investigations. In conjunction with zoning, a digital elevation model of the Zeya reservoir's bed was created, allowing calculating the reservoir's total methane emission. It has been determined that marshy tributaries and shallow aquatories, where organic matter flows from the banks, are the primary sources of organic matter and methane. During the summer, when shallow waters are heated, there is a significantly larger overall methane flux from the reservoir's surface. Methane emission coefficients from the Zeya Reservoir (8.6–17.2 kg CH₄/ha) are consistent with those from surface-based boreal reservoirs that are provided in the supplements to the 2019 IPCC Guidelines.

Keywords: Greenhouse gas emission, Methane, Hydrological structure, Hydrological regime, Water temperature, Zeya reservoir, Field survey, DEM (digital elevation model)