



ЭМИССИЯ МЕТАНА С ВОДОХРАНИЛИЩ РОССИИ

Гречушникова М.Г., вед.науч.сотр., Агафонова С.А., ст.науч.сотр., Василенко А.Н., ст.преподаватель,
Григорьев В.Ю., науч.сотр., Горин С.Л., вед.науч.сотр. ВНИИРО, Лисина А.А., асп., Ломов В.А., инженер,
Репина И.А., зам.директора ИФА РАН, Сазонов А.А., ст.преподаватель, Самсонов Т.Е., вед.науч.сотр.,
Соколов Д.И., ст.науч.сотр., Степаненко В.М., зам.директора НИВЦ МГУ, Терский П.Н., Фролова Н.Л.,
профессор, Щекотихин Ф.А., студ.

Москва
2025

Эмиссия метана

- **Болота** (138–165 Tg CH₄ yr⁻¹)
- **Озера** (23–142 Tg CH₄ yr⁻¹)
- **Рисовые чеки** (25–32 Tg CH₄ yr⁻¹),
- **Водохранилища** (9–28 Tg CH₄ yr⁻¹),
- **Прибрежные зоны** (5–28 Tg CH₄ yr⁻¹, <200 m)
- **Реки** (2–21 Tg yr⁻¹).

nature geoscience

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

[nature](#) > [nature geoscience](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | Published: 05 April 2021

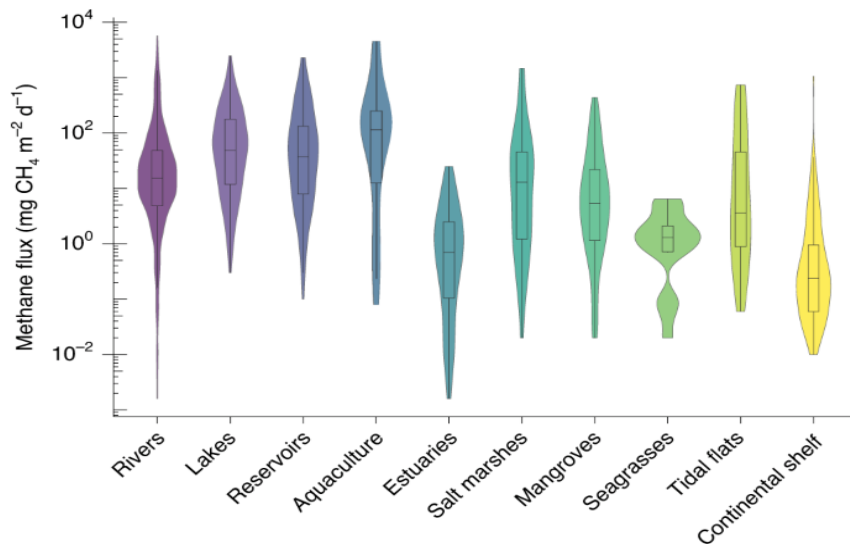
Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources

[Judith A. Rosentreter](#) , [Alberto V. Borges](#), [Bridget R. Deemer](#), [Meredith A. Holgerson](#), [Shaoda Liu](#), [Chunlin Song](#), [John Melack](#), [Peter A. Raymond](#), [Carlos M. Duarte](#), [George H. Allen](#), [David Olefeldt](#), [Benjamin Poulter](#), [Tom I. Battin](#) & [Bradley D. Eyre](#)

По данным на 2020-е годы, в мире **свыше 60 тысяч водохранилищ**.
Общая площадь водохранилищ составляет более 400 тысяч км²
(с учётом подпруженных озёр — 600 тысяч км²),
суммарный полный объём — 6,6 тысяч км³

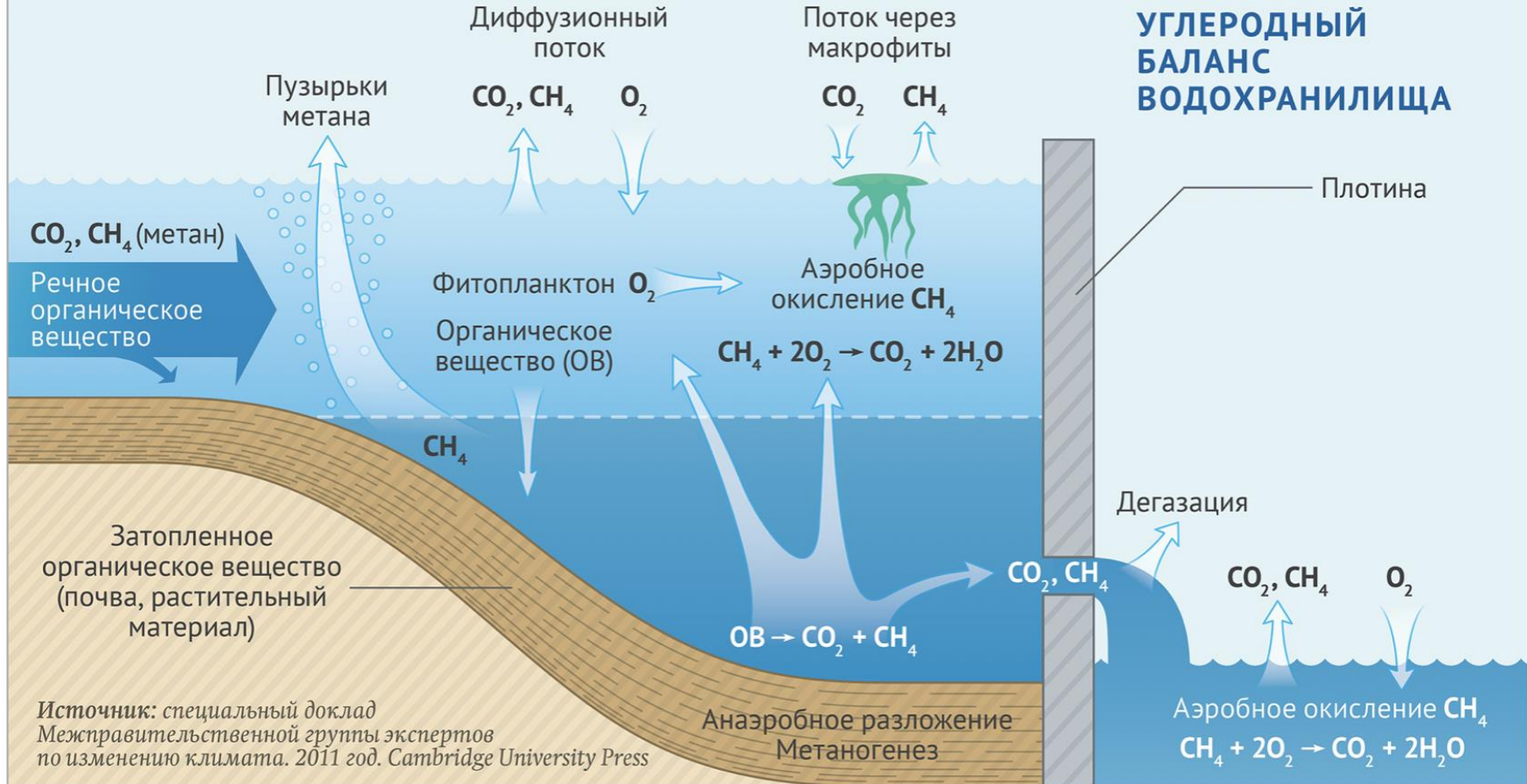
На территории Российской Федерации насчитывается 2290 средних и крупных водохранилищ, объемом более 1 млн м³ каждое, в т. ч. 103 — крупнейших (свыше 100 млн м³ каждое); кроме того около 30 000 мелких водохранилищ и прудов общим объемом более 800 км³

Fig. 1: Inland water and coastal ocean areal methane fluxes.



Общая эмиссия метана из пресноводных экосистем составляет 50% эмиссии от болот (IPCC, 2022)

УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ВОДОХРАНИЛИЩА



2008 г. – начало специального проекта Международной ассоциации гидроэнергетики (ИГА) и Международной гидрологической программы ЮНЕСКО по изучению роли водохранилищ в балансе парниковых газов

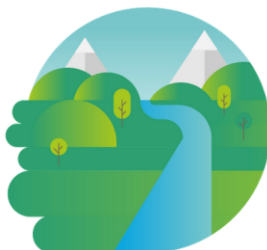


**Руководство по измерению выбросов
парниковых газов в пресноводных водоемах**

Полученный из:
Проект ЮНЕСКО/ИГА по исследованию выбросов парниковых газов из пресноводных водоемов

The carbon calculator for reservoirs

Assess, validate and report GHG emissions with the G-res Tool.



PRE-IMPOUNDMENT

Natural emissions

All ecosystems, including river systems, naturally emit greenhouse gases such as carbon dioxide and methane.

When a reservoir is created, there will be a change in GHG emissions which are dependent on local environmental conditions.



POST-IMPOUNDMENT

Net emissions

Greenhouse gases can be released when a reservoir is introduced due to the decomposition of organic material in the flooded area.

[READ MORE](#)

С 2019 г. – к изучению роли водохранилищ в балансе парниковых газов подключились российские энергогенерирующие компании Эн+ и Русгидро

ГЛАВНЫЕ ЗАДАЧИ проекта Измерение выбросов парниковых газов (ПГ) и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов

1. Разработка методики проведения исследований, экспериментальных измерений потоков парниковых газов (ПГ) с поверхности водохранилищ
2. Создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) водохранилищ
3. Организация и проведение натурных исследований по измерению выброса и поглощения ПГ с поверхности водохранилищ и в нижних бьефах ГЭС Группы РусГидро.
4. Определение запасов органического углерода (ОУ) в донных отложениях и содержания ОУ в воде рек и водохранилищ.
5. Оценка годовой эмиссии CH_4 с помощью численной модели LAKE 3.0
6. Определение среднегодовых коэффициентов по антропогенным потокам метана с поверхности водохранилищ
7. *Оценка максимально возможной эмиссии метана в зависимости от глубины водохранилищ и их физико-географического положения*

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохранилище / Характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Рыбинское	Куйбышевское	Волгоградское	Чиркейское	Саяно-Шушенское	Богучанское	Зейское	Бурейское	Колымское
Период наполнения	1941—1947 гг.	1955-1957 гг.	1958-1960 гг.	1970-1974 гг.	1975-1990 гг.	2012-2015 гг.	1975-1985 гг.	2003-2008 гг.	1980-1994 гг.
Вид регулирования	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Многолетнее
Главная река	Волга	Волга	Волга	Сулак	Енисей	Ангара	Зея	Буряя	Колыма
НПУ, м абс.	102,0	53,0	15,0	355,0	539,0	208,0	315,0	256,0	451,5
Площадь зеркала при НПУ, км ²	4550	6150	3117	42,4	608	2326	2420	740	441
Объем при НПУ, км ³	25,4	57,3	31,5	2,78	30,7	58,2	68,4	20,9	15,1
Глубина макс. при НПУ, м	30,4	41,0	41	140	220	74	100	125	121,5
Объем притока ср. годовой, км ³	31,4	264,5	260	5,55	47,3	80,7	24,7	27,49	14,7



Водохранилища в различных условиях:

- от субтропических до субполярных широт
- от умеренно-континентального до резко-континентального климата
- на равнинах и в горах
- в районах без многолетней мерзлоты и с ее развитием
- с различной степенью антропогенного воздействия
- самые «старые» эксплуатируются десятки лет, а самые «молодые» наполнены в последние 10-15 лет.



Всесезонные исследования в течение
3-х лет на 9 водохранилищах ПАО РУСГИДРО

1. Разработка методики проведения исследований, экспериментальных измерений потоков парниковых газов (ПГ) с поверхности водохранилищ

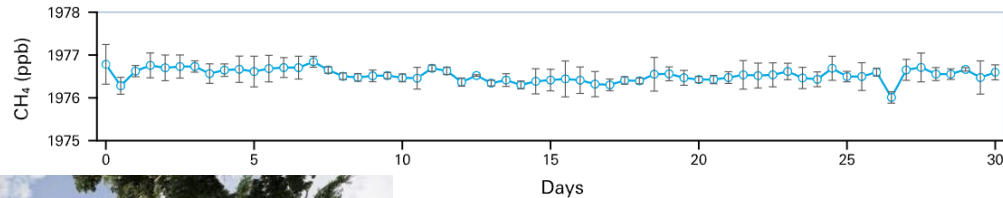
Метод ковариации пульсаций

Ограничение метода:

- Футпринт
- Установка мачты над водой: платформа
- Постранственные измерения



LI-7810 Long-Term Outdoor CH₄ Stability



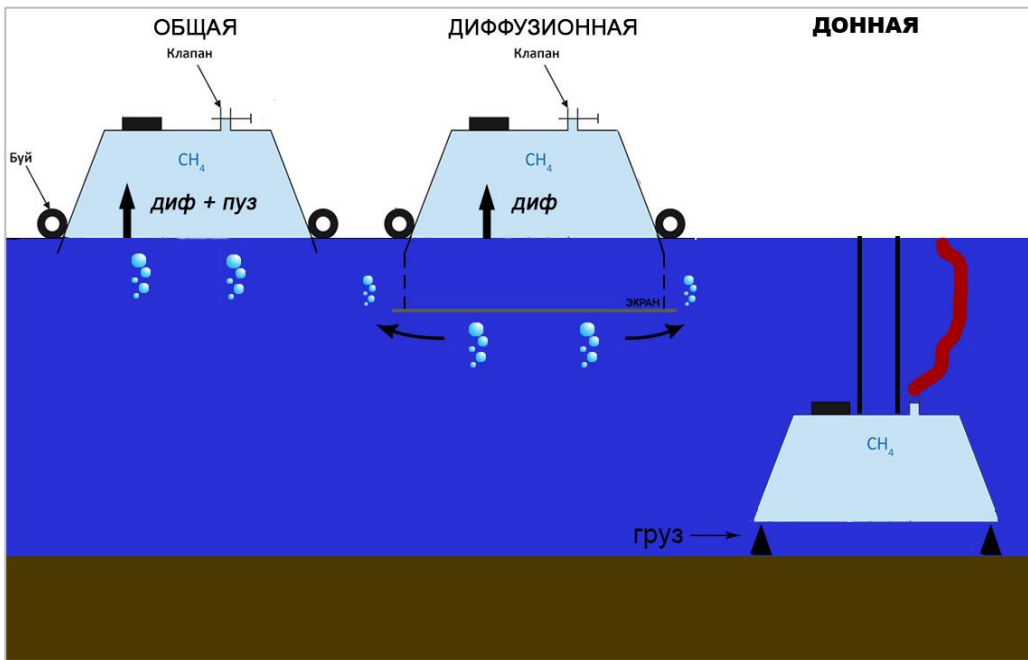
Портативный газоанализатор

Ограничение:

- Цена

1. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ (ПГ) С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

“Плавучие камеры” Содержание метана в отобранных пробах определялось в лаборатории ИФА РАН на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2



Концентрация
 $PV = nRT$
 $n[\text{ммоль}] = PV/RT$
 $C[\text{мг}] = n \cdot Mr$

TBL (диффузионный поток)
 $F = k \cdot (C_{\text{вода}} - C_{\text{возд}})$
 $k = k_{600} \cdot (Sc/600)^{-x}$
 $k_{600} = f(U_{\text{ветер}})$
 $x = 0,66 (U < 3 \text{ м/с}); 0,5 (U > 3 \text{ м/с})$

Камеры
 $F_{\text{сум}} = (C_{\text{кон}} - C_{\text{нач}}) / (S \cdot t)$

- ❖ Общая
- ❖ Диффузионная
- ❖ Донная

Ограничение метода:
частота измерений,
обмен воздуха в емкости

“Парофазная дегазация”

2. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА (ЦМР)



Цель разработки ЦМР - расчёт объёма воды и площади акватории для любых уровней воды и для любых участков (районов) водохранилищ. Это нужно для расчета объёма растворённого в воде CH_4 , а также эмиссии CH_4 на границе вода-атмосфера с учетом пространственной неоднородности распределения газа по акватории водохранилища.

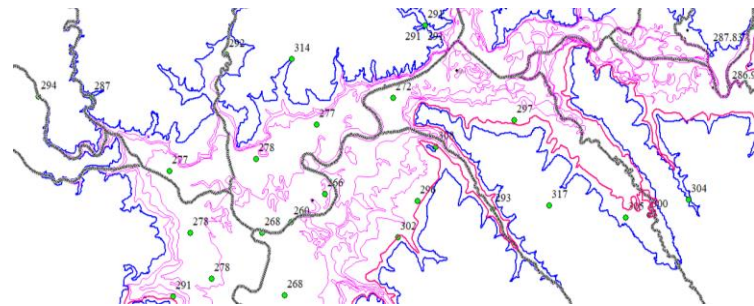
Источники данных:

1. Космические снимки с разрешением 10-15 м. (Sentinel, Landsat) для условий максимального диапазона колебаний уровня воды
2. Точечные промеры глубин
3. Открытые карты OpenTopoMap
4. Топографические планы 1 : 10 000 и крупнее
5. Топографические карты 1 : 50 000, 1 : 100 000
6. Речные карты-лоции, навигационные карты
7. Проектные материалы и схемы

Методика:

1. Векторизация графических материалов
2. Приведение всех высот к абсолютным отметкам
3. Подготовка дополнительных элементов рельефа (тальвегов в затопленных долинах рек)
4. Интерполяция методом ANUDEM (Хатчинсона)

Hutchinson M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. 1989. № 3–4 (106). p. 211–232.



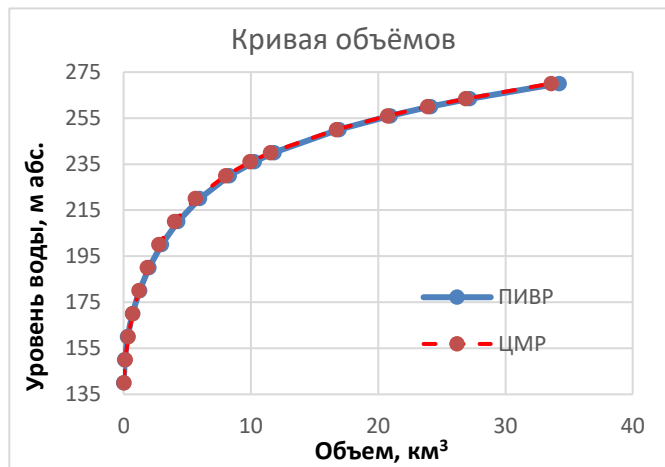
Фрагмент схемы исходных данных для создания ЦМР
Зейского водохранилища



Фрагмент схемы исходных данных для создания ЦМР
Чиркейского водохранилища

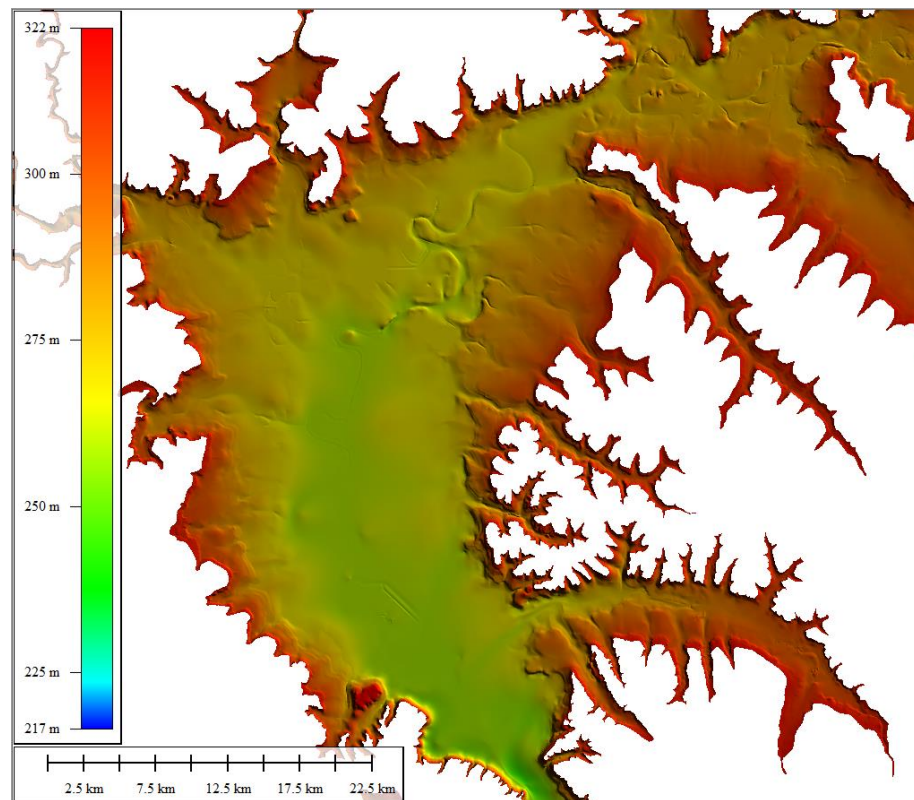
ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Результат – разработаны ЦМР всех водохранилищ в высоком разрешении с использованием всех доступных источников батиметрических данных и космических снимков с использованием современных и признанных методов обработки данных и геоинформационных стандартов. **Кривые площадей и объемов** сравнивались с данными ПИВР*.



Кривая объемов Бурейского водохранилища, полученная по ЦМР в сравнении с данными ПИВР.

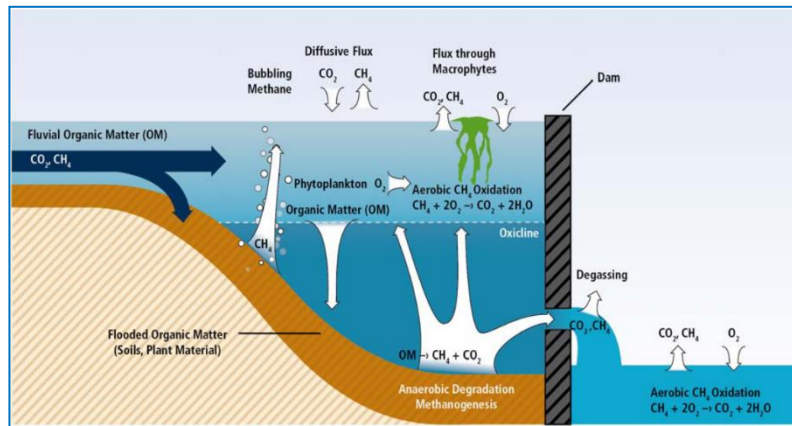
*ПИВР – Правила использования водных ресурсов водохранилищ



Фрагмент ЦМР Зейского водохранилища в растровом формате с разрешением 20 м в абсолютных отметках

3. Организация и проведение всесезонных натурных исследований по измерению выброса и поглощения ПГ с поверхности водохранилищ и в нижних бьефах ГЭС Группы РусГидро

СОДЕРЖАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАМПАНИЙ



Эмиссия CH_4 определяется:

- Поступлением CH_4 из донных отложений
- Продукцией CH_4 в воде водоема
- Притоком с водосбора (с природными и сточными водами),
- Расходом на окисление в водной толще и сброс в нижний бьеф (при дегазации воды, сбрасываемой через плотину).

Основное содержание полевых работ:

- Отбор проб воды на содержание растворенного метана из поверхностного и придонного горизонтов, а также из-под слоя скачка (как в русловой части, так и на пойме), в притоках и нижнем бьефе – только с поверхности.
- Зондирование толщи воды (с измерением температуры, электропроводности, растворенного кислорода)
- Измерение метеорологических характеристик (температура и влажность воздуха, атмосферное давление и скорость ветра), отбор проб воздуха.
- Определение удельного потока метана с поверхности воды методом плавучих камер (только на акватории водохранилищ, одновременно с отбором проб).
- Отбор проб донных отложений на содержание органического вещества.
- Отбор проб воды на содержание органического углерода.



СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Цели создания базы данных:

- Создание хранилища, в котором доступны данные натурных наблюдений
- Создание основы для пространственного анализа данных наблюдений
- Материал для моделирования термодинамического состояния водоема, концентраций и эмиссии метана
- Подготовка отчетных материалов по проекту

База данных представляет собой таблицы формата Microsoft Excel:

- Файлы типа IFA_rusgidro_meta_2D.xlsx – информация о станциях полевых работ
- Файлы типа IFA_rusgidro_main_DB_3D.xlsx – информация о горизонтах измерения/отбора проб

Разработанная структура базы данных позволяет выбирать и анализировать элементы:

- По водоемам
- По сезонам
- По гидрологическим районам
- По выборке приток/основная акватория
- По станциям, в том числе по повторяющимся от кампании к кампании
- По горизонтам внутри толщи, в том числе по поверхностным/придонным отдельно
- По оценке надежности измеренных характеристик
- По элементам приборной базы

Водохранилище	Состояние поверхности (открытая вода, ледостав)	Экспедиция № (отдельная порядковая нумерация по каждому водоему)	Станция (исходное наименование/номер как в полевом отчете, как написано на метановых флаконах)	Сквозная нумерация для всех кампаний (уникальный номер, повторяющиеся и однотипные станции имеют одинаковый номер)	Район (согласно единой схеме районирования объекта) - текстовое наименование не более 3-4 слов	Местоположение (краткое текстовое описание - одноименно для всех экспедиций)	Широта, градусы - десятичные в WGS84 (dd.ddd)	Долгота, градусы - десятичные в WGS84 (dd.ddd)	Дата и местное время (dd.mm.yyyy hh:mm)	Дрейф/стойка (1 - дрейф, 10 - стойка)	Уровень воды верхнего бьефа на конкретную дату (м абс)	Глубина общая на станции измеренная при рабочем уровне, NA - если нет (м)	Горизонт отбора пробы/измерения от поверхности (м)	Отметка о том, что проба или горизонт точно является придонным - не более 2 м над дном (1 - если да, NA - если нет)	Отметка о том, что проба или горизонт является поверхностной (1 - если да, NA - если нет)	Температура воды (градусы в С)	Концентрация O2 в воде (мг/л)	Концентрация O2 в воде (% насыщения)	Электропроводность при 25°C, мкСм/см	Концентрация метана в воде мкл/л	Углерод органический растворимый, мг/л	Углерод органический растворенный, мг/л	Углерод органический нерастворенный, мг/л	Поток метана на станции (мгCH4/м2/сут) - заполняется только для поверхностного горизонта, для остальных - NA	Измерение температуры и электропроводности из батометра (1 - да, 10 - зонд)	Измерение кислорода из батометра (1 - да, 10 - зонд)
character	character	numeric	character	numeric	character	character	numeric	numeric	datetime	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric
reservoir	season	expedition	station_num	station_rep	region	place	lat	lon	datetime_loc	drift_flag	wat_level	wat_depth	horiz_samp	bottom_flag	surface_flag	tmp	oxy_mg	oxy_percent	conduct	ch4_wat	corg_sum	corg_diss	corg_susp	flux_ch4	t_sampler	o_sampler
Свяно-Шушенское	открытая вода	5	4.2	27	Кантегирский залив	р. Кантегир, средняя часть залива	52.6192	91.1842	18.08.2023 11:58	1	536.48	130	129	1	NA	3.76	5.93	62.5	207	1.18	NA	NA	NA	NA	10	1
Свяно-Шушенское	открытая вода	5	4.3P	28	Кантегирский залив	р. Кантегир, речная часть	52.4945	91.0542	18.08.2023 08:15	1	536.48	NA	0	NA	1	18.5	5.93	63.1	NA	1.45	5.35	4.81	0.54	NA	NA	1
Свяно-Шушенское	открытая вода	5	5	5	приплотинная часть	район впадения р. Катущка	52.6894	91.3725	17.08.2023 13:03	1	536.38	208	0	NA	1	21.18	6.69	74.3	119	0.38	NA	NA	NA	0.57	10	1
Свяно-Шушенское	открытая вода	5	5	5	приплотинная часть	район впадения р. Катущка	52.6894	91.3725	17.08.2023 13:03	1	536.38	208	5	NA	NA	21.18	6.34	70.3	119	0.43	NA	NA	NA	NA	10	1

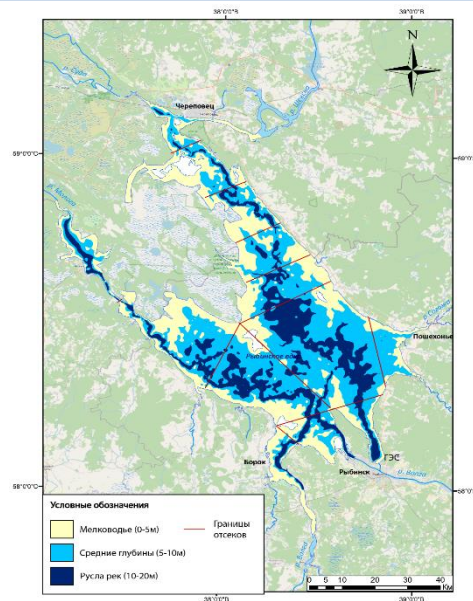
РЫБИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Самое старое водохранилище (из исследованных)
- Большая площадь акватории и небольшие глубины
- Интенсивный прогрев и перемешивание в летние месяцы
- Активное развитие фитопланктона
- Поступление коммунально-бытовых стоков в заливах и в районе впадения крупных притоков, что может приводить к эвтрофированию
- Выделено 9 отсеков (районов) водохранилища в зависимости от величины притока и степени трансформации водных масс в водохранилище

Краткие результаты:

- Потоки метана небольшие, могут возрастать в периоды тёплой безветренной погоды или при резких выбросах (весенний выброс, конец летней межени)
- Эмиссия метана происходит с пузырьковым потоком со дна, который по данным наблюдений составляет до 95% от общего потока на станции
- Концентрации метана в водохранилище небольшие, увеличиваются ко дну в летний период
- Органическое вещество (ОВ) поступает с притоками, в результате антропогенной нагрузки, в результате развития фитопланктона
- Концентрации ОВ незначительно различаются в разных частях водоёма за исключением заливов и устьев рек
- Наибольшие концентрации ОВ в донных отложениях наблюдаются в затопленных руслах и конусах выноса рек



Районирование Рыбинского вдхр.

Характеристика	Значение
Длина, км	172
Ширина, км	56
Площадь, км ²	4580
Максимальная глубина, м	30
Средняя глубина, м	5,6
Уровень ФПУ, м	103,81
Уровень НПУ, м	101,81
Уровень УМО, м	96,91
Полная емкость водохранилища, км ³	25,4
Полезная емкость водохранилища, км ³	18,6



КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Куйбышевское водохранилище – самое большое долинное водохранилище в Европе
- Водохранилище в каскаде - шестая ступень на р. Волге, однако оно аккумулирует незарегулированный сток воды крупнейшего притока Волги – р. Оки
- «Цветение» – существенный фактор экологического режима
- Коэффициент водообмена $4,1 \text{ год}^{-1}$
- В основе районирования лежит традиционное деление на плесы и заливы. В каждом районе объединено по 2-3 плеса



Районирование Куйбышевского водхр.

Краткие результаты:

- Для концентраций метана существует тенденция снижения значений от верховьев водохранилища к плотине на основной акватории, исключая заливы
- Для удельных потоков метана характерен большой разброс измеренных значений для каждой станции и средних значений станций внутри каждого района
- Выброс метана при дегазации на плотине ГЭС отсутствует в большинстве случаев
- В зимний период наблюдаются низкие значения запаса метана в воде и средневзвешенной концентрации метана



Характеристика	Значение
Нормальный подпорный (НПУ), м БС	53,0
Минимальный навигационный, м БС	49,0
Нормальной предполоводной сработки (УНС), м БС	48,0
Минимальный допустимый в зимний период (УМО), м БС	45,5
Площадь зеркала при НПУ, км ²	6150
УНС, км ²	3930
УМО, км ²	3060
Полная статическая емкость при НПУ, км ³	57,3
УНС, км ³	32,0
УМО, км ³	23,4

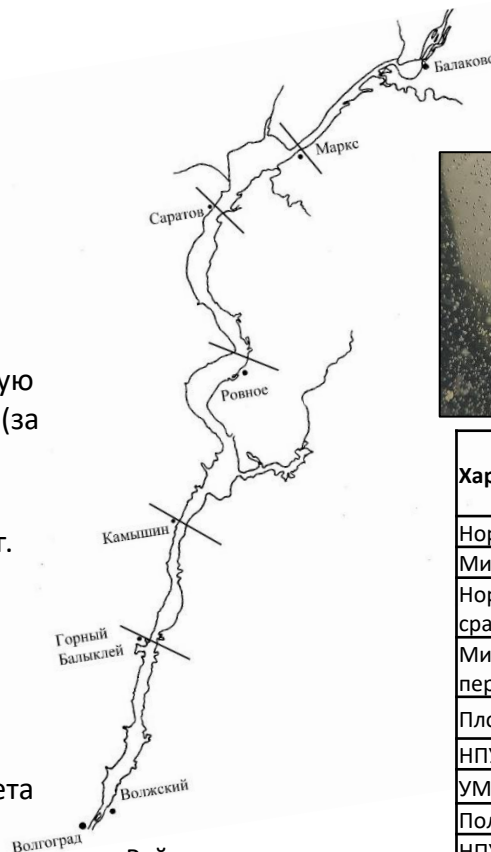
ВОЛГОГРАДСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

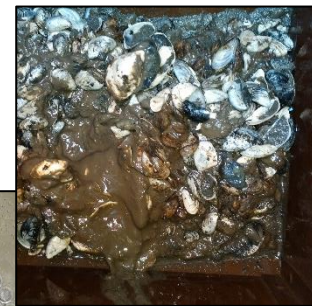
- Очень высокая проточность - коэффициент водообмена 7,57
- Сток всего бассейна Волги поступает в Волгоградское вдхр.
- Большая протяженность – 540 км

Краткие результаты:

- В условиях транзитного режима работы Саратовского и Волжского гидроузлов Волгоградское водохранилище большую часть года практически полностью вертикально перемешано (за исключением заливов)
- Максимальное содержание и потоки метана наблюдались в заливах, а на основной акватории водохранилищ – в районе г. Саратова – велико влияние антропогенной нагрузки
- Для Волгоградского водохранилища, по сравнению с Рыбинским и Куйбышевским, характерны невысокие содержание, запас CH_4 в водной толще и эмиссия CH_4
- Минимальные концентрации, запас и эмиссия метана наблюдались поздней осенью 2022 г., максимальные - для лета 2023 г.



Районирование
Волгоградского вдхр.



Характеристика	ПИВР (2012)
Нормальный подпорный (НПУ), м БС	15,0
Минимальный навигационный, м БС	14,0
Нормальной предполоводной сработки (УНС), м БС	14,0
Минимальный допустимый в зимний период (УМО), м БС	13,0
Площадь зеркала при	3631
НПУ, км ²	3248
УМО, км ²	2698
Полная статическая емкость при	
НПУ, км ³	28,08
УМО, км ³	22,17

ЧИРКЕЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Водохранилище небольшое, его длина (37,5 км) сопоставима с шириной (средняя ширина – 7 км, максимальная – 8 км)
- Мелководный район с глубинами 0,2 – 40 м составляет 60% всей площади водоема, мелководья регулярно сохнут.
- В настоящее время водоем значительно заилен, толщина отложений на приплотинном участке достигает 65 м.
- Водохранилище имеет олиготрофный статус

Краткие результаты:

- Относительно низкая температура воды в придонных слоях в течение всего года (не более 15°C в теплый период, в среднем около 10°C за год)
- Благоприятный кислородный режим с отсутствием зон гипоксии с насыщением не менее 40%.
- Донные отложения содержат мало органического вещества (не более 8%), поэтому его содержание в толще воды невелико (не более 12 мкл/л)
- Это способствует формированию низкого удельного потока CH_4 с поверхности водоема



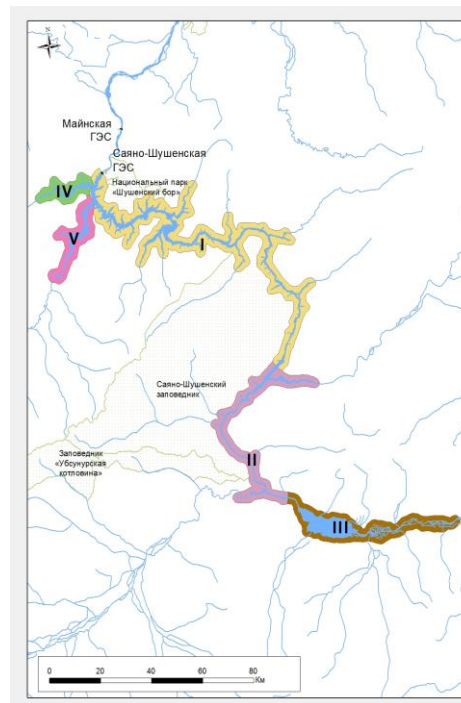
САЯНО-ШУШЕНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Самый высокий напор - глубина у плотины до 220 м.
- Морфологически сложное долинное водохранилище – Саянский каньон, Шагонарский плес
- Специфика гидрохимических условий Шагонарского плёса заключается в ежегодной смене объёма воды в данном районе водохранилища благодаря значительной сработке водоёма
- Антропогенная нагрузка, связанная с сельским хозяйством и коммунальной сферой, представлена главным образом в верхней части водохранилища на территории Республики Тыва

Краткие результаты:

- Выброс метана на плотине ГЭС практически полностью отсутствовал в период полевых измерений
- На долю Шагонарского плеса приходится более 80% эмиссии метана, на каньонную часть – менее 20%
- Концентрация и потоки метана самые низкие среди Сибирских водохранилищ



Районирование Саяно-Шушенского вдхр.

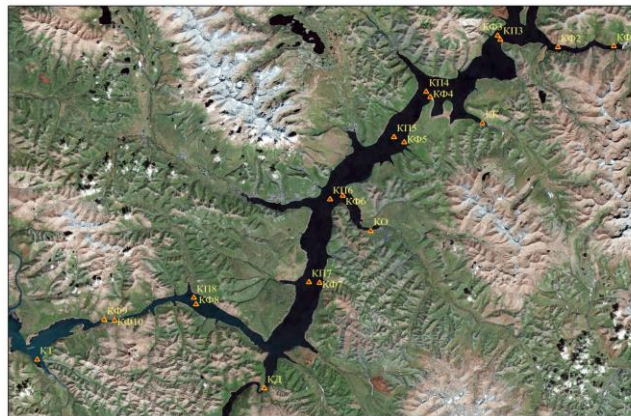


Нормальный подпорный уровень, НПУ, м БС	539
Минимальный допустимый уровень (мертвого объема), УМО, м БС	500
Форсированный подпорный уровень, ФПУ, м БС	540
Площадь зеркала при НПУ, км ²	608
Площадь зеркала при УМО, км ²	250
Полная статическая емкость, км ³ :	
- при НПУ	30,71
- при УМО	16,00
Протяженность водохранилища при НПУ, км	312

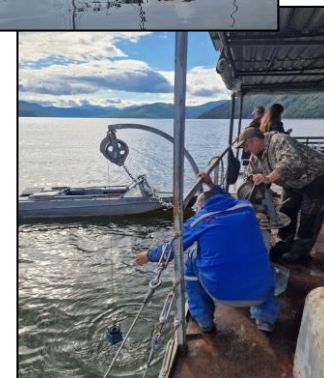
КОЛЫМСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Самое северное водохранилище, находится в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты
- Продолжительность ледостава на водоеме 4-5 месяцев
- Водохранилище морфологически относительно простое
- Районирование водохранилища содержит 9 областей по длине, приведенных в ПИВР



Снимок Колымского вдхр. с постоянной сеткой станций



Краткие результаты:

- Донные отложения, являющиеся основным источником метана, содержат мало органического вещества (для преобладающей части водохранилища не более 10%), поэтому его содержание в толще воды невелико
- Очень высокое содержание кислорода (зимой более 100%), нет зон гипоксии
- Потоки и эмиссия CH_4 со всей поверхности водохранилища самые низкие среди зауральских водохранилищ, наряду с С-Ш вдхр.

Площадь при НПУ, кв.км	440,7
Полная емкость, куб.км	14,56
Глубина, м	До 120
Длина, км	148
Ширина, км	До 6

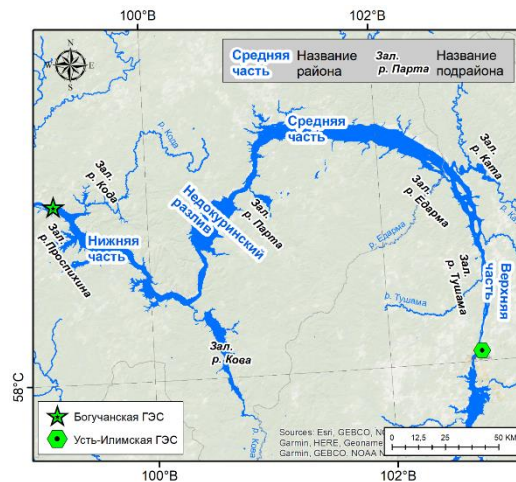
БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Самое молодое водохранилище (наполнение завершено в 2015 г), хотя сведение леса началось в 1970е гг.
- Значительный объем затопленного леса. На месте сведенного леса произошла сукцессия, при возобновлении строительства от леса повторно были очищены только отдельные участки
- Небольшой объем призмы регулирования, очень незначительные колебания уровня воды
- Преобладание в приходной части водного баланса сбросов Усть-Илимской ГЭС

Краткие результаты:

- Низкие величины удельного потока CH_4 в русловой части, и очень высокие в отдельных заливах (затопленные болота)
- Выброс CH_4 на плотине ГЭС выявлен только в одну кампанию, его величина менее 1% от полной эмиссии
- Содержание кислорода - от полного насыщения на поверхности, до гипоксии у дна в заливах



Районирование
Богучанского вдхр.

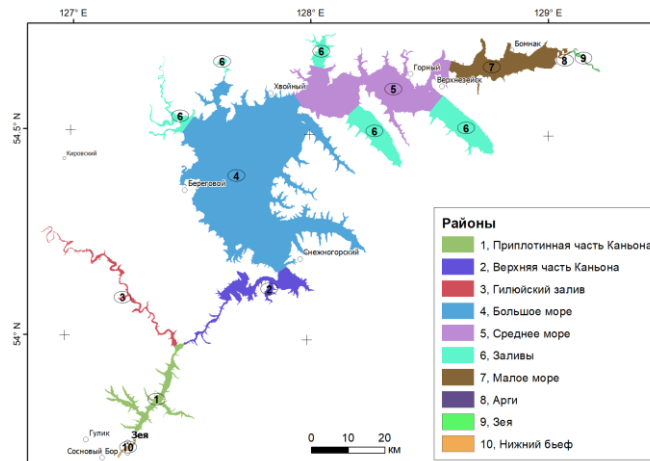


Отметка нормального подпорного уровня (НПУ), м	208
Отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ), м	209.5
Площадь зеркала при НПУ, км ²	2362
Полный объем, км ³	58.2
Полезный объем, км ³	2.31
Длина, км	375
Протяженность береговой линии, км	2430
Максимальная ширина, км	15
Максимальная глубина, м	70

ЗЕЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Очень малый коэффициент водообмена (0.39)
- Самый большой объем водохранилища среди исследованных (68 км^3)
- Морфологически неоднородно (широкий плес шириной до 25 км и узкий каньон длиной 75 км)
- На водосборе и по берегам участки островной многолетней мерзлоты
- В зимний период отмечаются сипы с выбросами CH_4



Районирование Зейского вдхр.



Краткие результаты:

- Очень высокое содержание кислорода (зимой более 100%), нет зон гипоксии
- Выброс CH_4 на плотине ГЭС выявлен только в одну кампанию, когда работал холостой водосброс, однако его величина менее 0,5% от полной эмиссии
- Основные источники CH_4 – отдельные притоки, дренирующие болотные массивы, а также мелководные заливы, в которых накапливается древесный материал с крутых склонов
- Запасы метана в водоеме в зимний период на порядок превышают таковые в теплый период, что говорит о значительной роли весеннего выброса в годовой эмиссии метана

Уровень воды: УМО / НПУ / ФПУ*, м абс.	299,0 / 315,0 / 322,0
Длина: при УМО и НПУ, км	225 и 290
Ширина: наибольшая (средняя) при НПУ, км	24 (8,4)
Глубина: наибольшая (средняя**) при НПУ, м	96 (28,7)
Площадь: при УМО / НПУ / ФПУ, км ²	1620 / 2419 / 2955
Объем: при УМО / НПУ / ФПУ / среднееголетний, км ³	36,3 / 68,4 / 87,4 / 63,0
Средний годовой сток в створе плотины, км ³	24,8

БУРЕЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Особенности:

- Молодое водохранилище (наполнено к 2009 г)
- Морфологически неоднородное (два больших плеса, остальная часть – глубокий узкий каньон)
- Оползень сошел в 2018 г. в центральной части водохранилища. Завал сильно сузил русло водоема и образовал порог на дне. С тех пор здесь каждую зиму образуется полынья, полностью перекрывающая все русло водохранилища
- Значительны колебания уровня воды в течение года (до 20 м)



Районирование Бурейского вдхр.

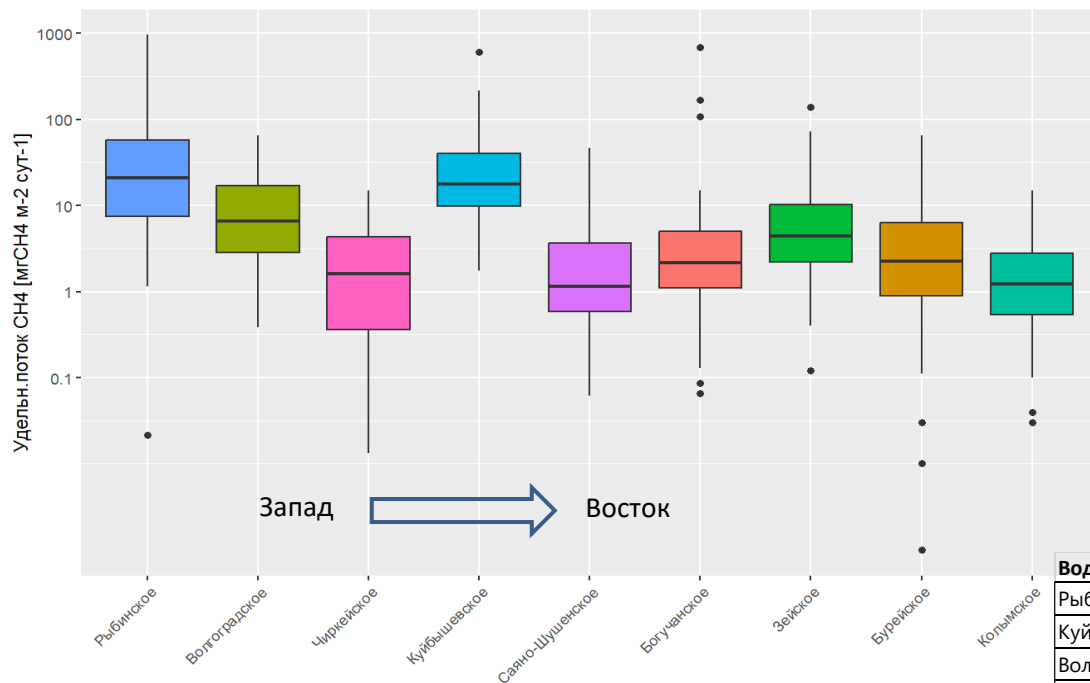
Краткие результаты:

- Полное вертикальное перемешивание происходит в течение 2-3 декад в ноябре и 1-2 декад в апреле-мае.
- Очень высокое содержание кислорода (зимой более 100%), нет зон гипоксии
- В верховьях мелководных заливов содержание CH_4 значительно выше, чем в глубоководной части водохранилища. В мелководной части летом метана намного меньше, чем зимой. В глубоководной – наоборот. Концентрации CH_4 в крупных притоках значительно меньше, чем в малых
- В разгар лета наблюдаются самые высокие в году потоки метана, они приурочены к мелководным заливам, а также к Малому морю

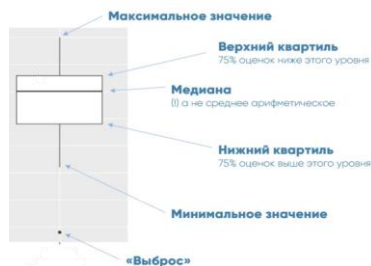


Уровень ВБ, м	Объемы , км ³	Площади, км ²
при ФПУ (261,7 м)	25,6	900
при НПУ (256,0 м)	20,9	740
при УМО (236,0 м)	10,2	370

УДЕЛЬНЫЙ ПОТОК МЕТАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ



Пояснение к диаграмме:



Выводы:

- Измеренный удельный поток метана имеет значительный разброс по величине (например, два порядка на Богучанском вдхр.)
- Осреднение потоков для расчета полной эмиссии использовать не корректно
- Требуется детализированный экспертный подход к расчету полной эмиссии, основанный на районировании и анализе распределения глубин по площади водоемов

УП CH_4 по результатам всех полевых кампаний

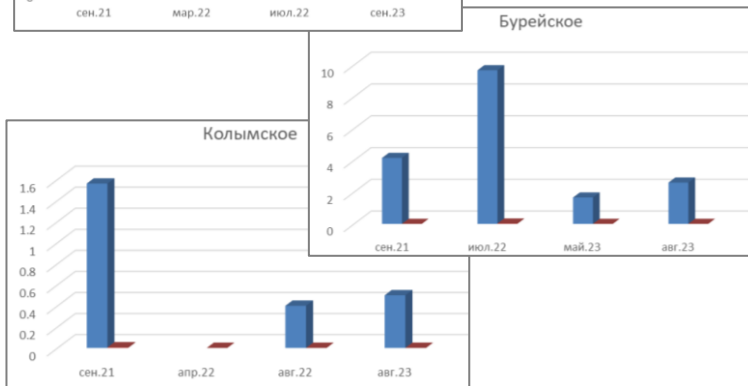
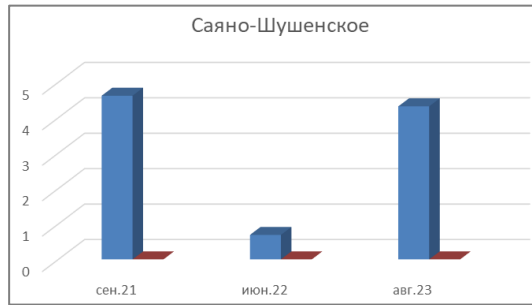
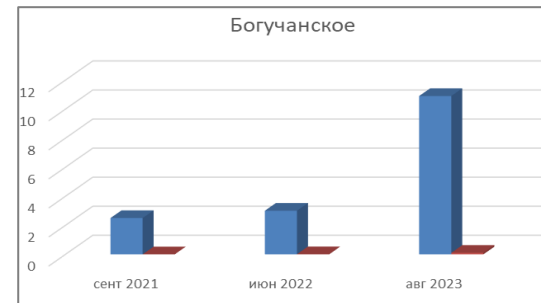
Водохранилище	Средний УП	Станд.Откл.	Медиана	Ко-во измерений
Рыбинское	85.1	182	21.15	64
Куйбышевское	51.5	104	17.62	76
Волгоградское	12.6	14.8	6.58	128
Зейское	11.6	21.8	4.41	124
Бурейское	5.48	9.14	2.26	204
Богучанское	21.0	96	2.1	108
Чиркейское	3.3	4	1.6	60
Саяно-Шушенское	4.10	8.51	1.16	82
Колымское	1.98	2.65	1.12	102

Примечание: УП- удельный поток, единицы измерения $\text{мгCH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$

РАСЧЕТ ЭМИССИИ $\text{тCH}_4/\text{сут}$ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

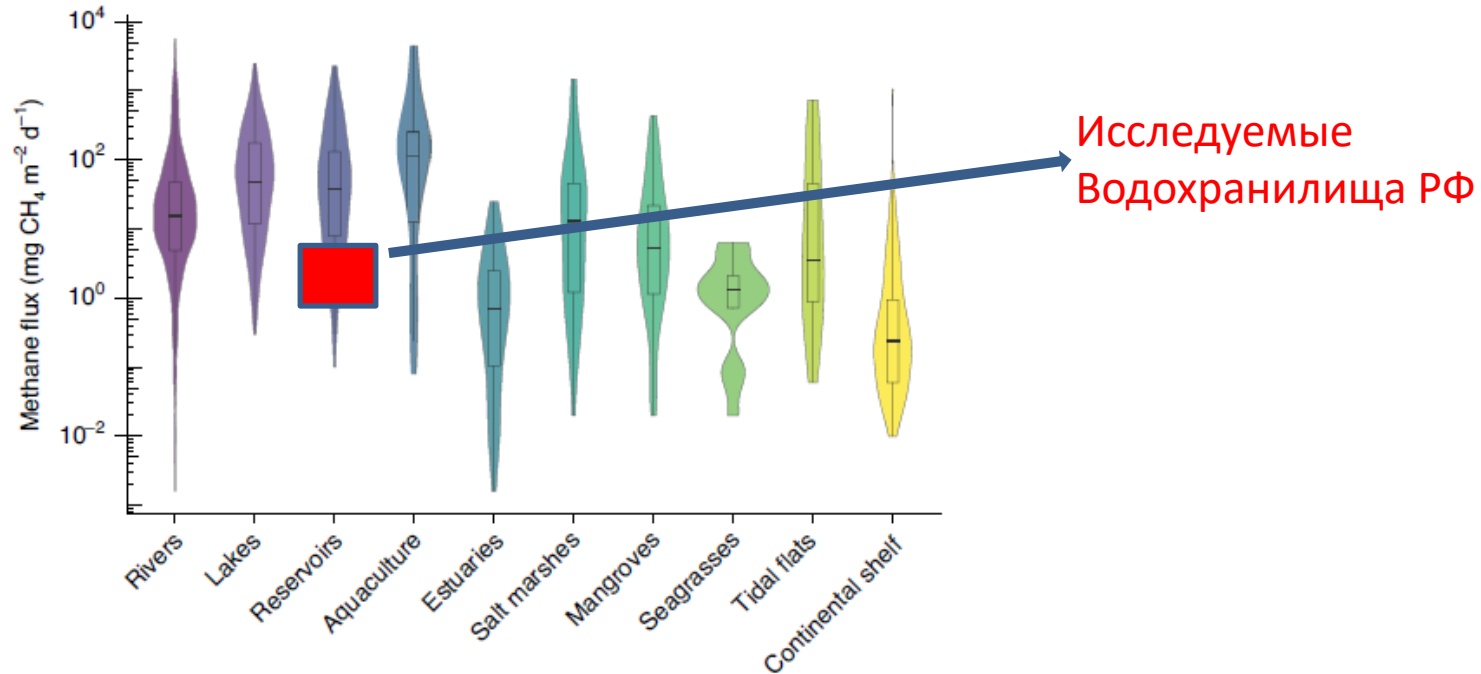
Экспертный подход с учетом:

- Районирования водоема
- Площади мелководий
- Наличия и количества «горячих точек»
- Информации о работе гидроузла



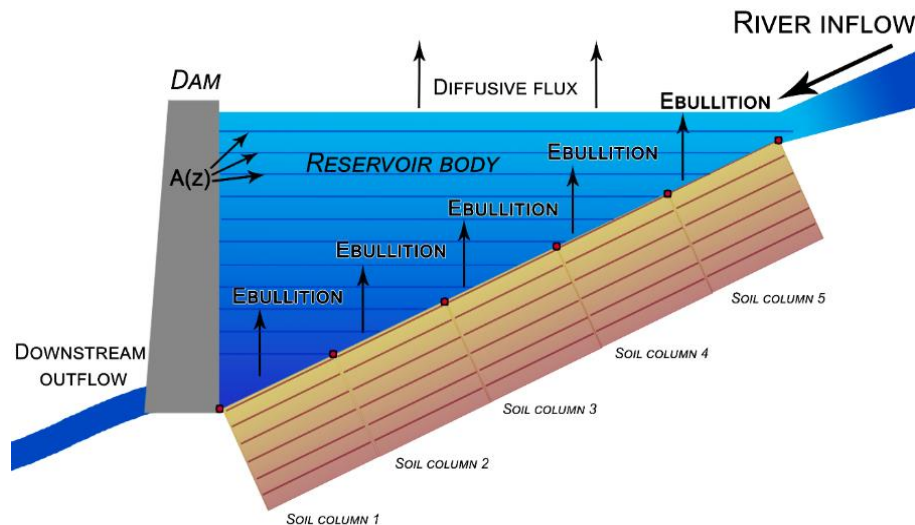
СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С МИРОВЫМИ

Rosentreter J. A. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources //Nature Geoscience. 2021. V. 14. №. 4. P. 225-230



5. Оценка годовой эмиссии CH_4 с помощью численной модели LAKE 3.0

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ LAKE 3.0

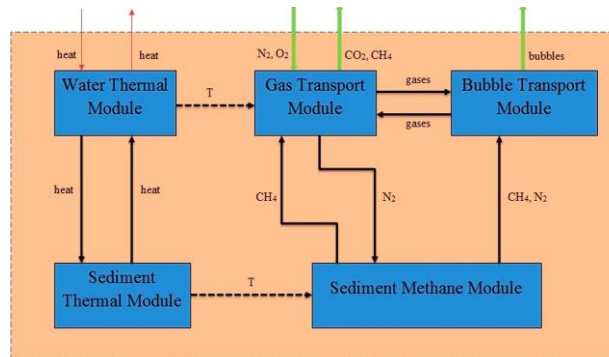


LAKE позволяет рассчитывать потоки газов:

- диффузионный поток с поверхности водоёма
- пузырьковые потоки, рассчитываемые отдельно над слоями донных отложений
- сброс через вытекающий водоток (турбины в случае гидроэлектростанций).

LAKE - одномерная модель пограничного слоя, разработана для моделирования гидрологических, термодинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах. Модель учитывает следующие процессы:

- фотосинтез, дыхание, выделение и отмирание фито- и зоопланктона
- аэробное разложение растворённых органических соединений и детрита
- фотохимическое разложение растворённых органических соединений
- аэробное окисление метана



ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ LAKE 3.0

Входные метеоданные (реанализ ERA5-Land):

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

Начальные условия:

- Профиль температуры воды 4 °C
- 100% насыщения кислорода в воде
- нулевые концентрации всех биохимических параметров модели

Калибровка (подбор параметров и эволюционные алгоритмы):

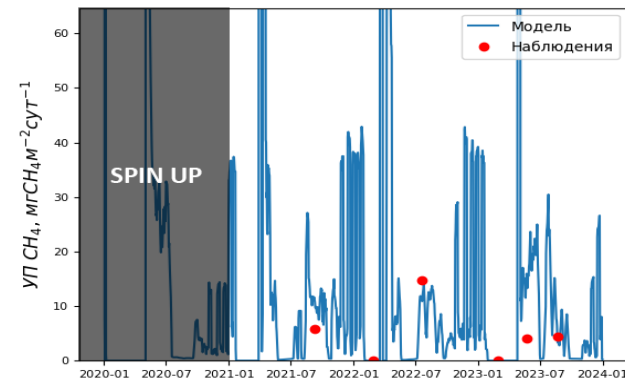
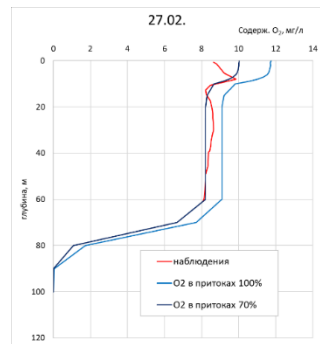
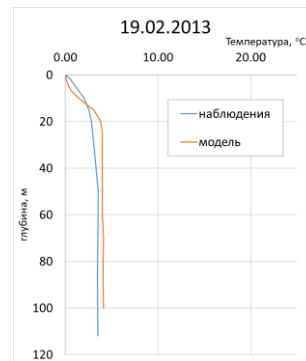
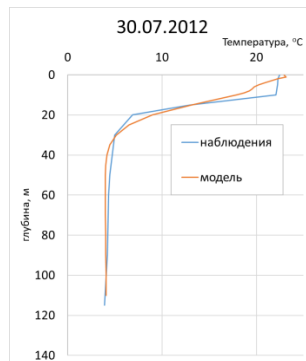
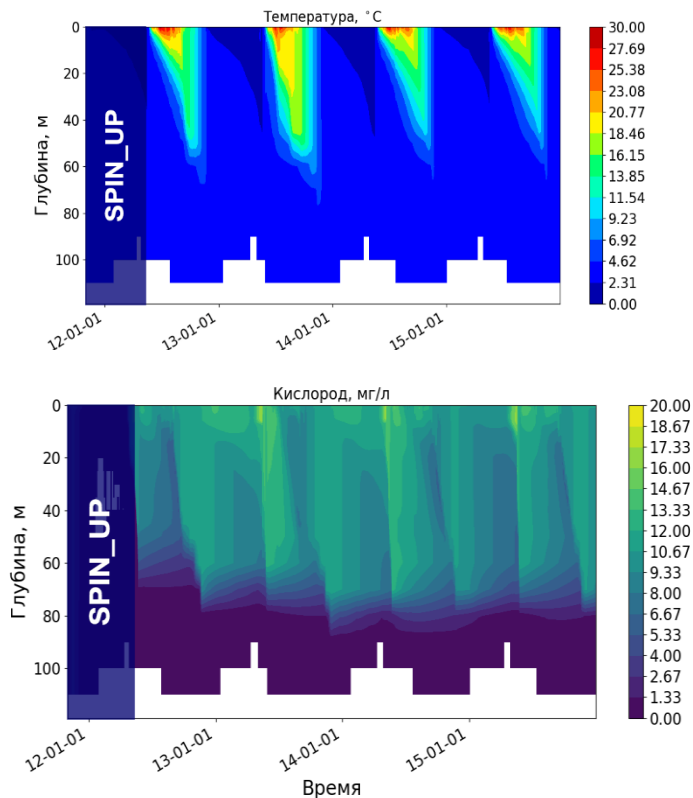
- Температура
- Содержание растворенного кислорода
- Потоки метана в атмосферу
- Концентрация метана в воде
- Количество запусков: 20 ~ 100, в зависимости от хода калибровки

СПРТРУ

- Время расчета для всех водохранилищ – 2020 – 2023 гг., включая разгонный 2020 г.
- Результаты модели получены с 01.01.2021 по 31.12.2023.
- Шаг расчета модели составлял 1800 секунд, машинное время счета одного эксперимента – около 40 – 60 секунд.

ПРИМЕР КАЛИБРОВКИ МОДЕЛИ LAKE

Пример – Бурейское водохранилище



ЭМИССИЯ CH_4 - СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЙ

Водохранилище	Ср. взв. УП метана по данным наблюдений, $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$	УП метана по результатам модели за периоды проведения полевых кампаний, $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$	гМАЕ по УП метана
Рыбинское	66.9	29.1	-56.6%
Бурейское	4.82	6.83	41.6%
Волгоградское	8.56	8.68	1.39%
Куйбышевское	15.0	15.0	-1.00%
Чиркейское	4.04	1.87	-53.6%
Зейское	4.91	6.40	30.5%
Колымское	1.47	1.83	24.6%
Богучанское	1.42	0.95	-33.1%
Саяно-Шушенское	3.67	2.90	-20.9%

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛНОЙ ЭМИССИИ CH₄

Водохранилище	Эмиссия метана в углеродном эквиваленте по модели, тыс. тонн C-CH ₄			
	2021	2022	2023	Средняя за 3 года
Рыбинское	33.4	31.7	34.0	33.0
Бурейское	2.25	2.55	1.62	2.14
Волгоградское	14.4	10.8	15.8	13.7
Куйбышевское	12.5	12.9	16.5	14.0
Чиркейское	0.0365	0.0568	0.0733	0.10
Зейское	1.08	2.77	1.51	1.79
Колымское	0.188	0.382	0.328	0.30
Богучанское	1.39	0.73	1.60	1.24
Саяно-Шушенское	1.58	1.75	1.69	1.67

6. Определение среднегодовых коэффициентов по антропогенным потокам метана с поверхности водохранилищ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ CH_4 И ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ



Общие выбросы от водохранилищ ($F_{\text{CH}_4\text{tot}}$) определяются как сумма выбросов с поверхности водохранилища ($F_{\text{CH}_4\text{res}}$) и выбросов, которые происходят ниже по течению от плотины ($F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$)

$$F_{\text{CH}_4\text{tot}} = F_{\text{CH}_4\text{res}} + F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$$

Для оценки вклада деятельности человека в общие выбросы от затопленных земель предлагается использовать площади категорий, преобразованных в водохранилища, и вычесть территорию, которая до затопления была в категории неуправляемых озер, рек/ручьев и водно-болотных угодий из общей площади водохранилищ, на основании того, что выбросы на этих неуправляемых землях не включаются в национальные кадастры парниковых газов.

$$F_{\text{CH}_4\text{anthrop}} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{n_{\text{resi}}} \alpha_i (EF_{\text{CH}_4\text{age}>20,j} \cdot A_{\text{anthrop } j,i}) + F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$$

$F_{\text{CH}_4\text{anthrop}}$ - оценка антропогенной составляющей общих годовых выбросов CH_4 с затопляемых земель;

$A_{\text{anthrop } i,j}$ - площадь, связанная с антропогенной составляющей выбросов и включающая все площади водной поверхности водохранилищ i возрастом > 20 лет i , расположенных в климатической зоне j , за исключением территорий, которые были неуправляемыми водными объектами (озера и реки);

$F_{\text{CH}_4\text{downstream}}$ - Годовые выбросы CH_4 ниже по течению;

α_i - поправка на коэффициент выбросов для трофического состояния водохранилища;

$EF_{\text{CH}_4\text{age}>20,j}$ = Коэффициент выбросов CH_4 с поверхности водохранилищ возрастом > 20 лет.

Разработана методика и выполнен модельный расчет притока углерода с речным стоком.

Источники поступления взвесей – почвенная (бассейновая) и русловая эрозия.



$$W_{C_{total}} = W_{RUSLE} \cdot C_{орг} \cdot SDR + W_{берег} \cdot C_{орг}$$

$$SDR = \frac{W_{RUSLE} - W_{dep}}{W_{RUSLE}}$$

W_{RUSLE} – бассейновая эрозия (Мт/год)

W_{dep} – аккумуляция наносов (Мт/год)

SDR – коэффициент доставки наносов

$W_{берег}$ – эрозия берегов (Мт/год)

$C_{орг}$ – содержание углерода в почвогрунтах (%)

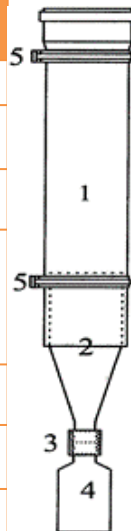
$W_{C_{total}}$ – аккумуляция $C_{орг}$ в водохранилищах (Мт/год)

ОЦЕНКА ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Волжские водохранилища

Аккумуляция Сорг в ДО (по В.В. Законнову)

Водохранилище	Рыбинское	Куйбышевское	Волгоградское
Площадь, км ²	4550	6450	3117
Средняя глубина, м	5,6	9	10,2
Водообмен, год ⁻¹	1,9	4,5	9,3
Скорость осадко накопления, мм/год	2,5	4,5	3,5
Масса ДО, млн т	175,6	520,0	204,6
Сорг (ср% по массе)	4,7	2,2	1,6
Период	38 лет	28 лет	28 лет
Аккумуляция Сорг за период, тыс т	8176	11400	3350
Скорость аккумуляции С орг, г\м ² год	47	63	38



Зауральские водохранилища

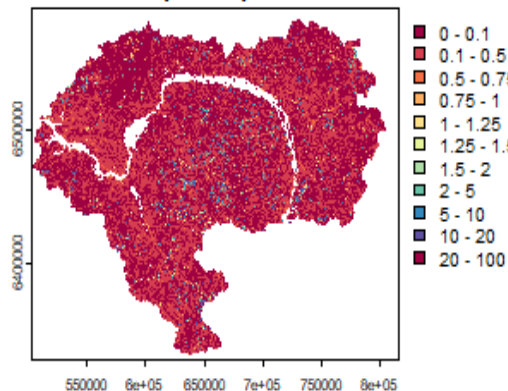
Постановка седиментационных ловушек.



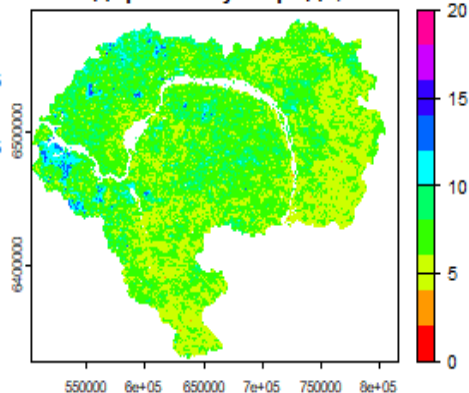
Водохранилище	ОВ%	Сорг%	Аккумуляция, г/м ² сут
Бурейское	28,2	11	1,51
	22,2	8,2	1,2
	20,3	7,6	1,2
Колымское	55,2	16,1	1,1
Зейское	29,4	11,4	0,62
Чиркейское	6,7	1,4	14,1

ОЦЕНКА ПРИТОКА ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА С РЕКАМИ

Водосборная эрозия, т/га



Содержание углерода, %



Водохранилище	Суммарный приток углерода, Мт С/год	Доля русловой составляющей, %
Колымское	1,195	38,5
Саяно-Шушенское	1,741	12,1
Богучанское	0,110	36,4
Зейское	0,848	16,5
Бурейское	0,535	15,0

Характеристика	Чиркеевское	Рыбинское	Куйбышевское	Волгоградское	Богучанское	Саяно-Шушенское	Колымское	Зейское	Бурейское
Удельное осаждение органического вещества в водохранилище, $C-CO_2$ кг/м ² /год;	12,6-18,8	0,2	0,2	0,1	0,1	1,1-1,8	2,3-9,5	0,7-1,4	3,1-3,2
Накопление Сорг в ДО, тыс. т/год	146-217	215	407	120	42.4	348	276-1140	469-908	624-647
Содержание Сорг в донных осадках, %	0,71	5,6	2,5	1,9	3,5 (10,6)	4,2	3,9	5,9	7

РАСЧЕТ БАЛАНСА ВЫБРОСА И ПОГЛОЩЕНИЯ CH_4 и CO_2

Категорирование водохранилищ климатическим условиям

Водохранилище	T, C	Осадки, мм	Климатическая зона
Колымское	-12	300	Бореальный влажный
Бурейское	-2	550	Бореальный влажный
Волгоградское	8	450	Прохладный умеренный влажный
Богучанское (моложе 20 лет)	-1	500	Бореальный влажный
Зейское	-2	520	Бореальный влажный
Куйбышевское	5	520	Прохладный умеренный влажный
Рыбинское	4	660	Прохладный умеренный влажный
Чиркейское	13	365	Теплый умеренный / сухой
Саяно-Шушенское	-0,5	720	Бореальный влажный

Водохранилище	Безледный период, кол-во дней
Чиркейское	365
Рыбинское	198
Куйбышевское	212
Волгоградское	239
Богучанское	179
Саяно-Шушенское	290
Колымское	165
Зейское	250
Бурейское	250

Источники сведений:

- Главное управление МЧС по Амурской области <https://28.mchs.gov.ru/>
- Мирзоев и др. 2005.
- Исаев, Карпова, 1989.
- Кальная, Аюнова, 2014.
- Ушаков, 2020.

РАСЧЕТ БАЛАНСА ВЫБРОСА И ПОГЛОЩЕНИЯ CH_4 и CO_2

Категорирование водохранилищ по трофическому статусу

Водохранилище	Трофность
Куйбышевское	Эвтрофное
Волгоградское	Мезотрофное
Богучанское	Олиготрофное
Рыбинское	Эвтрофное
Зейское	Мезотрофное
Бурейское	Мезотрофное
Колымское	Мезотрофное
Рыбинское	Эвтрофное
Чиркейское	Олиготрофное
Саяно-Шушенское	Мезотрофное

Водохранилище	Периоды измерений
Куйбышевское	Весна, лето, осень
Волгоградское	Весна, лето, осень
Богучанское	Весна, лето, осень
Рыбинское	Весна, лето, осень
Зейское	Весна, лето, осень
Бурейское	Весна, лето, осень
Колымское	Весна, лето, осень
Чиркейское	Все сезоны
Саяно-Шушенское	Весна, лето, осень

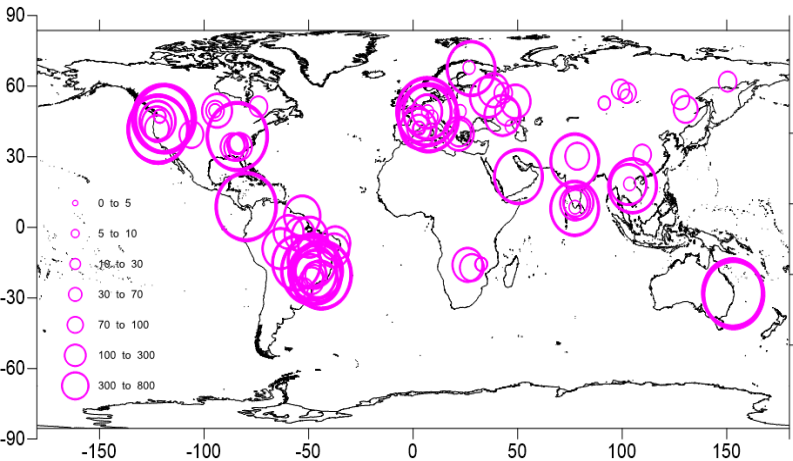
Источники сведений о трофическом статусе:

- Минеева, 2012; Дрюккер, 1994
- Собственные оценки

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭМИССИИ: ИЗМЕРЕНИЯ И МГЭИК

Название водохранилища	Климатическая зона по МГЭИК	Коэффициент, кг CH ₄ /га модель	Нижний и верхний предел 95% дов. инт. среднего значения	Коэффициент МГЭИК 2019, кг CH ₄ /га	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения
<u>Колымское</u>	Бореальный влажный	1,8	0,6-4,2	13,6	7,3-19,9
<u>Бурейское</u>	Бореальный влажный	16,1	5,8-26,5	13,6	7,3-19,9
<u>Волгоградское</u>	Прохладный умеренный влажный	32,1	20,7-43,5	54,0	48,3-59,5
<u>Богучанское</u>	Бореальный влажный	2,4	1,0-3,6	13,6	7,3-19,9
<u>Зейское</u>	Бореальный влажный	9,8	3,5-22,3	13,6	7,3-19,9
<u>Куйбышевское</u>	Прохладный умеренный влажный	26,7	16,5-36,9	54,0	48,3-59,5
<u>Рыбинское</u>	Прохладный умеренный влажный	59,5	47,9,3-71,1	54,0	48,3-59,5
<u>Чиркейское</u>	Теплый умеренный / сухой	14,1	6,8-21,5	150,9	133,3-168,1
<u>Саяно-Шушенское</u>	Бореальный влажный	16,1	6,3-25,9	13,6	7,3-19,9

Коэффициенты выбросов CH₄ для водохранилищ старше 20 лет по МГЭИК (Международная группа экспертов по изменениям климата)



Вдхр РУСГИДРО	Среднее кг CH ₄ /га год	95%
Бореальный	4,2	1,9-6,5
Прохладный умеренный	40,9	27,4-54,4

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

7. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ЭМИССИИ МЕТАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ



Зависимость удельного потока метана с районов разнотипных водохранилищ разной глубины

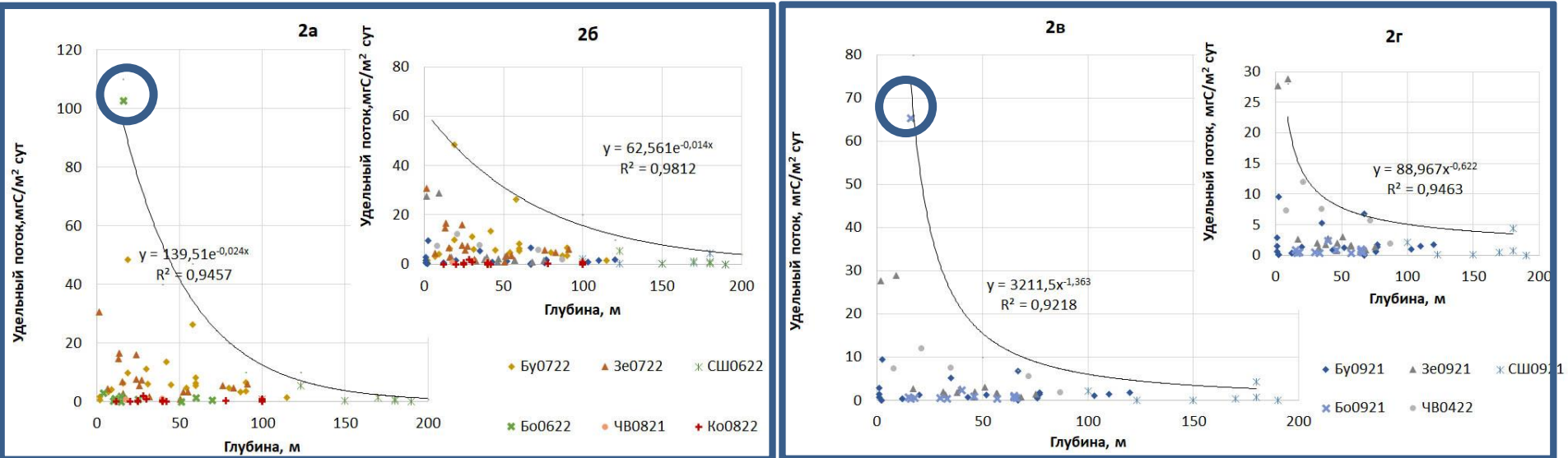
В-ще	Нмах, м
Чиркейское	120
Бурейское	130
Колымское	120
Зейское	100
Богучанское	74
Саяно-Шушенское	220

Волгоградское	41
Рыбинское	30
Куйбышевское	41
Можайское	23
Горьковское	22
Иваньковское	19
Озернинское	21
Цимлянское	36

Водохранилища были сгруппированы по признаку максимальной глубины

- ✓ **Глубина** водоема оказывает значительное влияние на его термический и кислородный режим. Глубоководные водохранилища расположены в горных районах, обычно имеют олиготрофный или мезотрофный статус
- ✓ Равнинные водохранилища обычно более мелководны с максимальной глубиной порядка 30-40 м, что обуславливает лучшее прогревание придонных слоев.
- ✓ Водосборы равнинных водохранилищ подвержены активной антропогенной деятельности (промышленность, сельское хозяйство, урбанизация), что обуславливает приток в водохранилища взвешенных и растворенных веществ, мезотрофный или евтрофный статус, формирование донных отложений с большей долей органической составляющей по сравнению с водоемами горных территорий.

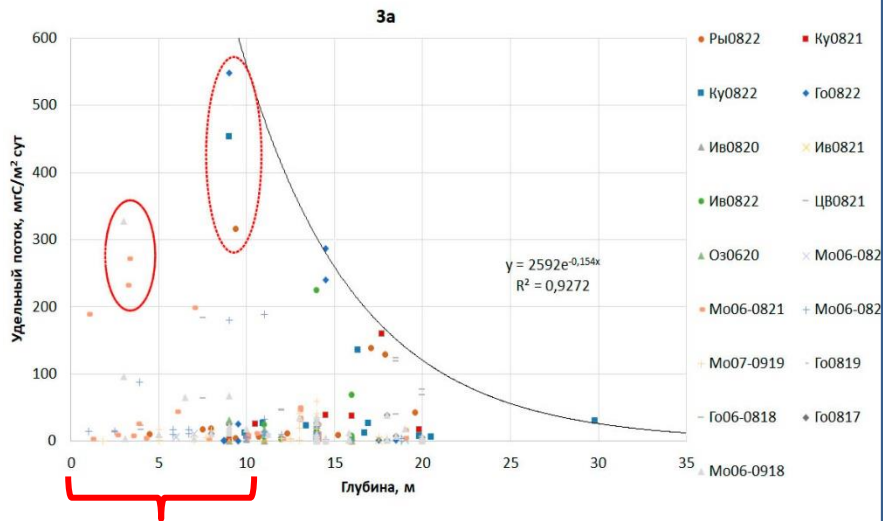
Глубоководные водохранилища



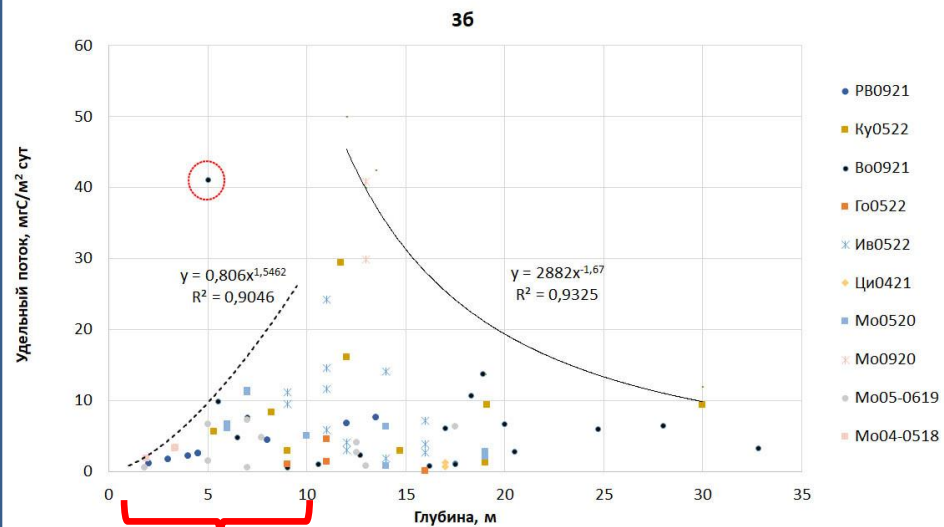
Зависимость удельного потока метана от глубины с районов глубоководных водохранилищ: 2а – в периоды стратификации, 2в – при отсутствии стратификации, 2б и 2г – без учета локального максимума в Ковинском плесе Богучанского водохранилища (затопленное болото).

Малые значения удельного потока метана в первой группе обусловлены их трофическим статусом и хорошей аэрацией водной толщи. Низкие значения температуры воды в придонных слоях являются причиной меньшей активности метанообразующих бактерий, большая глубина – более полное окисление метана в водной толще. Малые различия потока по сезонам

Мелководные водохранилища



Большой разброс в интервале 0-10 м



Большой разброс в интервале 0-10 м

Зависимость удельного потока метана с районов мелководных водохранилищ разной глубины:

3а – в период стратификации, 3б – при отсутствии стратификации.

Наличие бескислородного слоя в придонных горизонтах водоема не является обязательным условием больших значений потока метана (пузырьки)

Неопределенность при глубинах менее 10 м:

Чем меньше глубина, тем больше вероятность перемешивания водоема до дна и снижения значения потока из-за аэрации.

Неопределенность значений удельного потока с мелководий: различный состав донных отложений и наличие/отсутствие макрофитов (важен их видовой состав)!

УП метана над разнотипными макрофитами Шошинского плеса Иваньковского в-ща (август 2023)



Нимфейник щитолистный

24,7-84,2 мгС/м² сут



Уруть водная

128-146 мгС/м² сут

ИТОГИ РАБОТЫ

1. На основе данных полевых измерений за 2021-2023 гг. на 9 водохранилищах (Колымское, Бурейское, Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское и Саяно-Шушенское) показаны особенности каждого водохранилища. Создана база данных измеренных гидрофизических характеристик, удельного потока и содержания метана, содержания органического углерода в реке и водохранилище в летний и зимний сезоны
2. Проведены оценки содержания органического углерода в донных отложениях. Разработана методика и выполнен модельный расчет притока углерода с речным стоком в 5 водохранилищ крупных рек Сибири и Дальнего Востока
3. Проведена разработка национальных коэффициентов потоков метана с поверхности водохранилищ для разных климатических зон, исследованные водохранилища составляют около 30% площади всех водохранилищ РФ.
4. С помощью модели LAKE 3.0 была получена оценка баланса метана из водохранилищ. Модель откалибрована по результатам натурных измерений, воспроизведен температурный, кислородный режим водоемов, а также суточный ход УП CH_4 . Получена оценка годовой эмиссии CO_2 и скорости седиментации OB в углеродном эквиваленте в донные отложения.
5. Предложена оценка максимального потока метана с разнотипных водохранилищ

Перечень публикаций по результатам проекта:

Статьи в журналах:

1. Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л. и др. // Натурные измерения метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 году. Начало масштабных исследований. *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49, № 6. С. 713–718. [[DOI](#)]
2. Field measurements of methane emission at largest reservoirs in russia in 2021. the start of large-scale studies / I. A. Repina, P. N. Terskii, S. L. Gorin et al. // *Water Resources*. — 2022. — Vol. 49, no. 6. — P. 1003–1008. The article presents data on measurements of methane fluxes at largest Russian reservoirs, carried out in August and September 2021 under long-term research project. [[DOI](#)]
3. И. А. Репина, М. Г. Гречушникова, Н. Л. Фролова и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 6. С. 899–913. [[DOI](#)]
4. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir / V. Lomov, V. Stepanenko, M. Grechushnikova, I. Repina // *Water*. — 2024. — Vol. 16, no. 1. — P. 76. [[DOI](#)]
5. Исследование применимости полупроводниковых метановых датчиков для измерения эмиссии метана с водных объектов / А. Д. Мершавка, И. А. Репина, Р. Д. Макаров и др. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2023. — Т. 36, № 3. — С. 224–238. [[DOI](#)]
6. Терский П.Н., Горин С.Л., Репина И.А., Агафонова С.А., Зимин М.В., Шестеркин В.П., Щекотихин Ф.А. (2023). Эмиссия метана и гидрологическая структура Зейского водохранилища в теплый период года по данным натурных измерений в сентябре 2021 и июле 2022 гг. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – в печати

Перечень публикаций по результатам проекта:

Статьи в сборниках:

1. Эмиссия метана из Зейского водохранилища в маловодных и многоводных условиях по данным натурных исследований / П. Н. Терский, С. Л. Горин, С. А. Агафонова, И. А. Репина // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. — Санкт-Петербург: 2023. — С. 541–546.
2. *Шестеркин В. П., Терский П. Н., Горин С. Л.* Гидрохимия Зейского водохранилища в многоводные годы // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. — Т. 10. — Владивосток: Наука, 2023. — С. 284–290. [[DOI](#)]
3. *Репина И. А., Гречушникова М. Г., Терский П. Н.* ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭМИССИИ МЕТАНА КРУПНЕЙШИХ ВОДОХРАНИЛИЩ РФ // Гидрометеорологические исследования в условиях изменения климата: актуальные проблемы и пути их решения. Материалы международной научно-практической конференции. Ташкент, 3-4 июня 2022 год. — Ташкент: 2022. — С. 153–158.
4. Pavel N. Terskii , Sergey L. Gorin, Maria G. Grechushnikova, Svetlana A. Agafonova, and Irina A. Repina (2024). Insight Into hydrological State and Methane Emissions in Warm and Cold Seasons 2021-2022 on Deep Zeya Reservoir (Far East, Russia) // Proceedings GREG 2022 – in press
5. Терский П. Н. , Горин С. Л. , Гречушникова М. Г., Агафонова С.А., Репина И.А. (2022) 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: Изд-во Казан. ун-та, 2022. — С. 45–45
6. *Василенко А. Н., Григорьев В. Ю., Репина И. А.* Гидрологические характеристики большого молодого Богучанского водохранилища по данным полевых исследований 2021–2023 гг // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен [Электронный ресурс], под редакцией О.М. Макарьевой, П.А. Никитиной. — Санкт-Петербург: ООО Издательство ВВМ, 2023. — С. 64–69.

Статьи в сборниках:

7. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С. Параметризация удельного потока метана с акватории водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов = Modern problems of reservoirs and their catchments [Электронный ресурс] : труды IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (г. Пермь, 25–28 мая 2023 г.). — Т. 1. — Пермский государственный национальный исследовательский университет Пермь: 2023. — С. 237–241.
8. И. А. Репина, Д. В. Мишин, А. А. Строков и др. Особенности пространственно-временного распределения метана в водной толще Саяно-Шушенского водохранилища по результатам полевых исследований 2021-2022 гг // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ВОДОСБОРОВ, Труды IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Пермь, 25 мая–28 мая 2023 г.). — Т. 2 из КАЧЕСТВО ВОДЫ. — Пермь: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. — С. 128–132.
9. Лисина А. А., Сазонов А. А., Репина И. А. Экспедиционные исследования эмиссии метана с поверхности Колымского водохранилища // Инновации в геологии, геофизике и географии – 2022. Материалы 7-ой Международной научно-практической конференции / Под ред. Н. В. Лубнина. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство Перо, 2022. — С. 1–134.
10. И. А. Репина, Д. В. Мишин, А. А. Тимошенко и др. Специализированный мониторинг параметров гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием, Барнаул, 29 августа – 03 сентября 2022 года / Институт водных и экологических проблем СО РАН. Институт водных проблем РАН. — Т. 3. — Барнаул: ООО Пять плюс Барнаул: 2022. — С. 158–165.
11. И. А. Репина, С. А. Агафонова, А. А. Мольков и др. Результаты измерения потоков метана в Куйбышевском водохранилище / // ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА (ВОЛГА-2021) Труды 6-й всероссийской научной конференции. — Т. 4. — Нижний Новгород: 2021. — С. 26.
12. М. Г. Гречушникова, И. А. Репина, Д. В. Ломова, В. А. Ломов Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ / // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. — Издательство ИГУ Иркутск: 2021. — С. 165–171.