



Эмиссия метана с поверхности водоемов: опыт, проблемы, перспективы

Гречушникова Мария Георгиевна,

Ломова Д.В., Ломов В.А., Казанцев В.С., Репина И.А.

Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва

e-mail: allavis@mail.ru

**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.,
Ломова Д.В., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Фролова Н.Л.**

Финансовая поддержка: анализ РНФ 24-27-00034; полевые работы ПАО Русгидро

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](#)

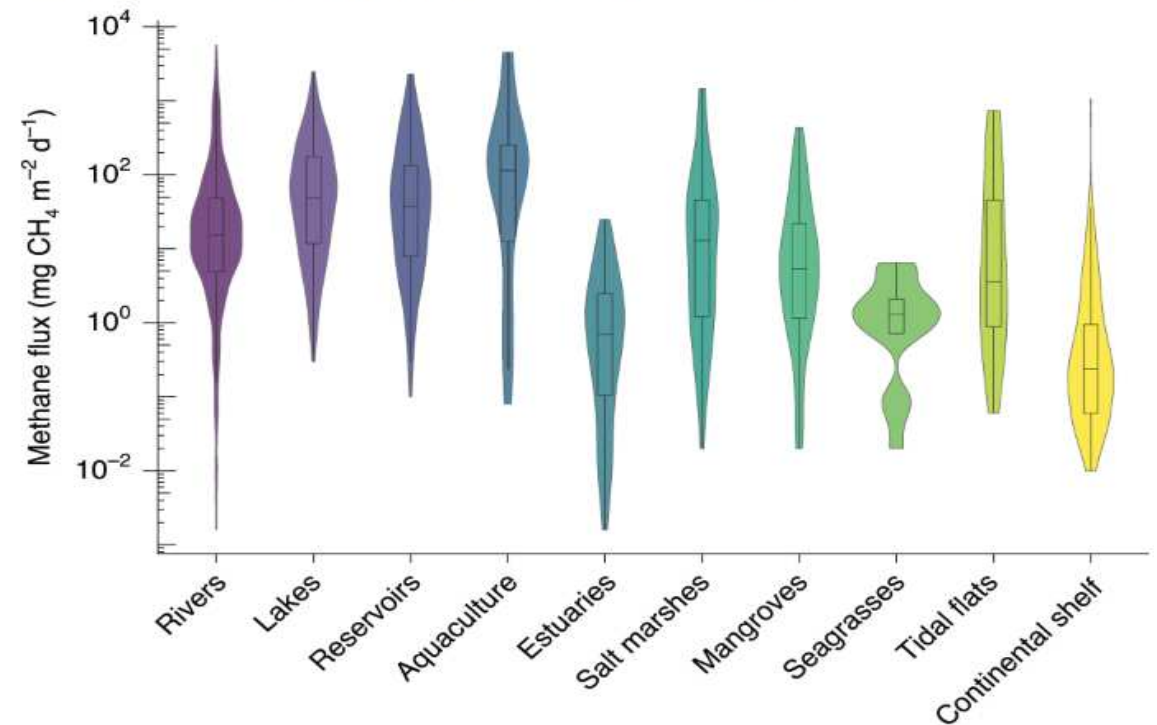
Article | [Published: 05 April 2021](#)

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

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



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

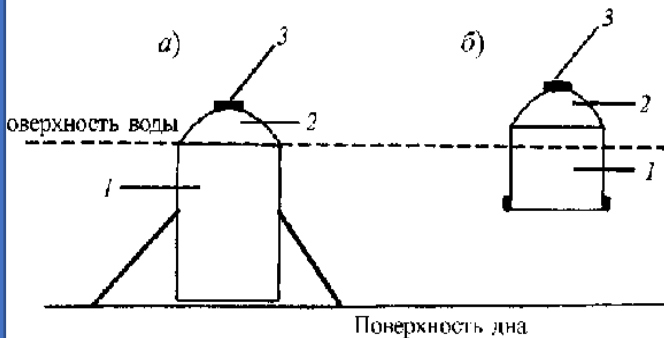
Изученность вопроса: выход из ДО

ИБВВ Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.

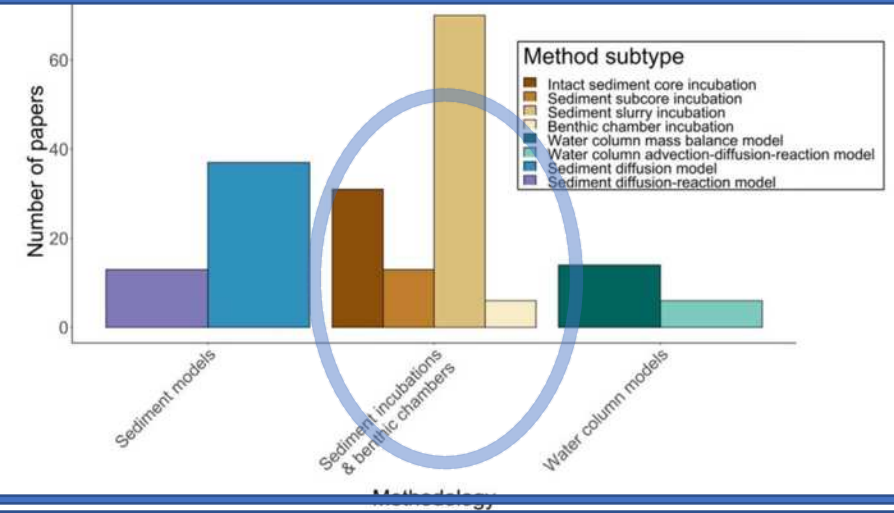
Метод трубок (экспозиция кернов)

ЮФУ Д. Н. Гарькуша, Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул//Метеорология и гидрология, 2016, №6. С. 48-58.

Метод донных камер



D'Ambrosio SL and Harrison JA (2022) Measuring CH₄ Fluxes From Lake and Reservoir Sediments: Methodologies and Needs. Front. Environ. Sci. 10:850070. doi: 10.3389/fenvs.2022.850070



МГИ Т. В. Малахова, А. А. Будников, И. Н. Иванова, А. И. Мурашова Измерения флюидной разгрузки метана ловушечным методом в бухте Ласпи (Черное море)//ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2020. № 6. С. 162–167

$$F_{\text{CH}_4} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{S \cdot T}, \quad (1)$$

де F_{CH_4} — поток флюидной разгрузки CH₄ ммоль/м²сут; V_{CH_4} — объем CH₄ (ммоль/м²сут); S — площадь сечения ловушки ($1.3 \cdot 10^{-3}$ м²); T — время экспозиции (0.042 сут).

Объем газа рассчитывался по формуле (2):

$$V_{\text{CH}_4} = (C2_{\text{CH}_4} - C1_{\text{CH}_4}) \cdot V_{\text{inst}}, \quad (2)$$

де $C2_{\text{CH}_4}$ — концентрация CH₄ в конечный момент ммоль/л; $C1_{\text{CH}_4}$ — концентрация CH₄ в начальный момент (ммоль/л); V_{inst} — объем установки (л).

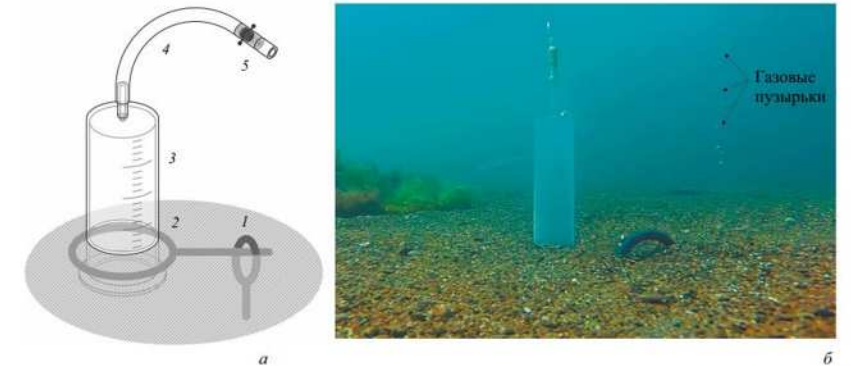


рис. 2. Схема флюидной ловушки: а — 1 и 2 — фиксирующие кольца, 3 — цилиндрический контейнер, 4 — соединительный шланг, 5 — кран для отбора проб, б — подводное фото установленной ловушки и газовых пузырьков

Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.



Водохранилище	мгСН ₄ /м ² сут
Рыбинское	0,1-33,1
Горьковское	2,2-115,2
Чебоксарское	0,1-108
Куйбышевское	0,04-25,2
Саратовское	0-14,4
Волгоградское	0-55,4

Выход метана из ДО зависит от типа грунта и загрязнения: наименьшая скорость метаногенеза характерна для песков и глинистых грунтов речных участков, а максимальная — для осадков загрязняемых зон

Изученность вопроса: УП на поверхности

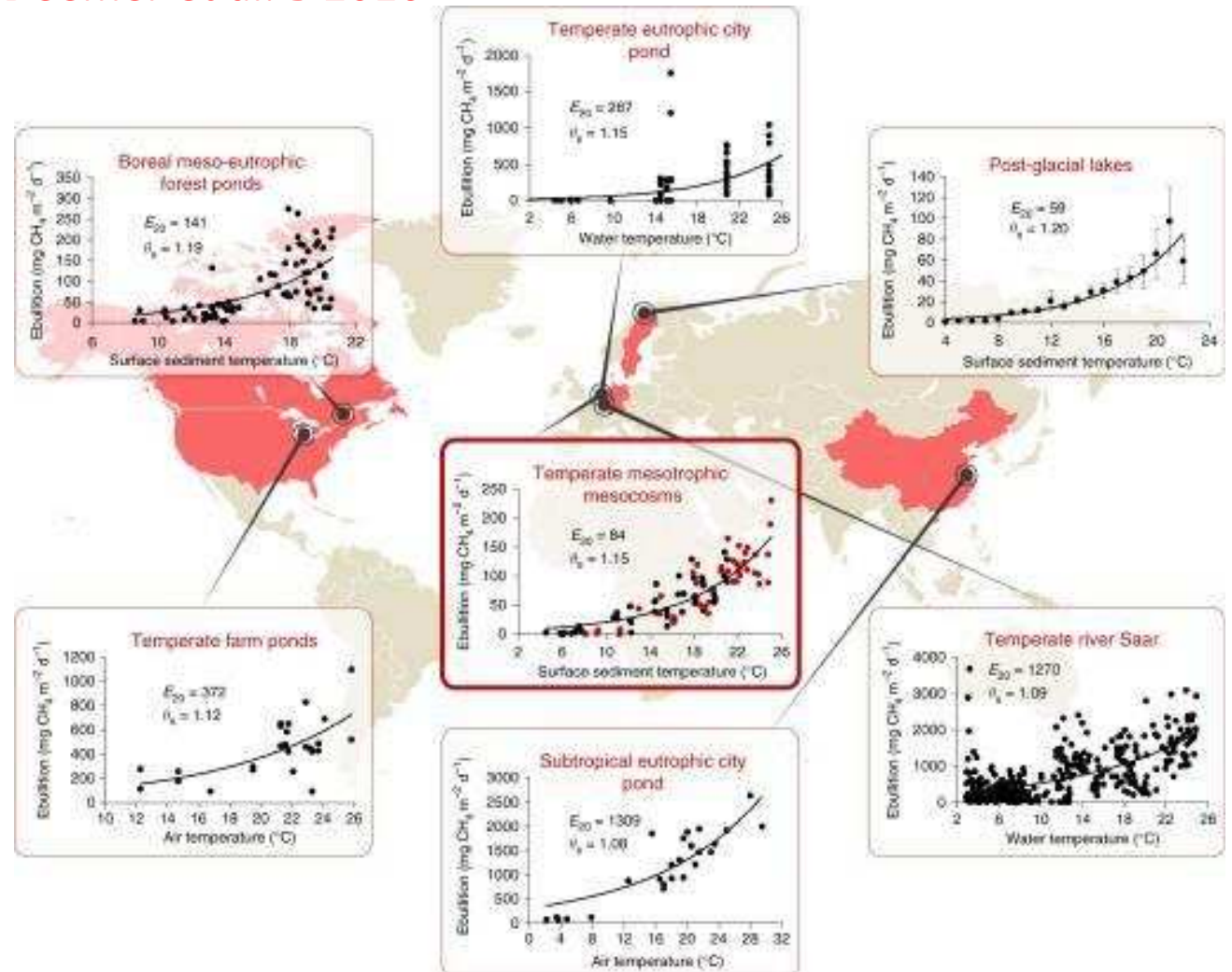
Первичной основой для оценок, приведённых в рассматриваемой БД, являются данные, полученные в ходе натурных измерений на 198 водохранилищах (127 измерений диффузионного потока и 71 измерение пузырькового потока), собранные в **Deemer et al. в 2016**

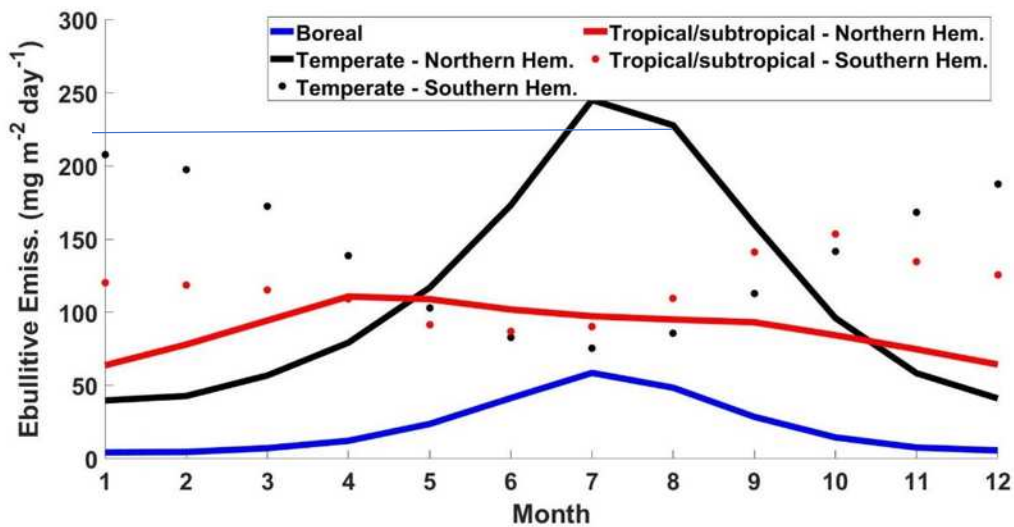
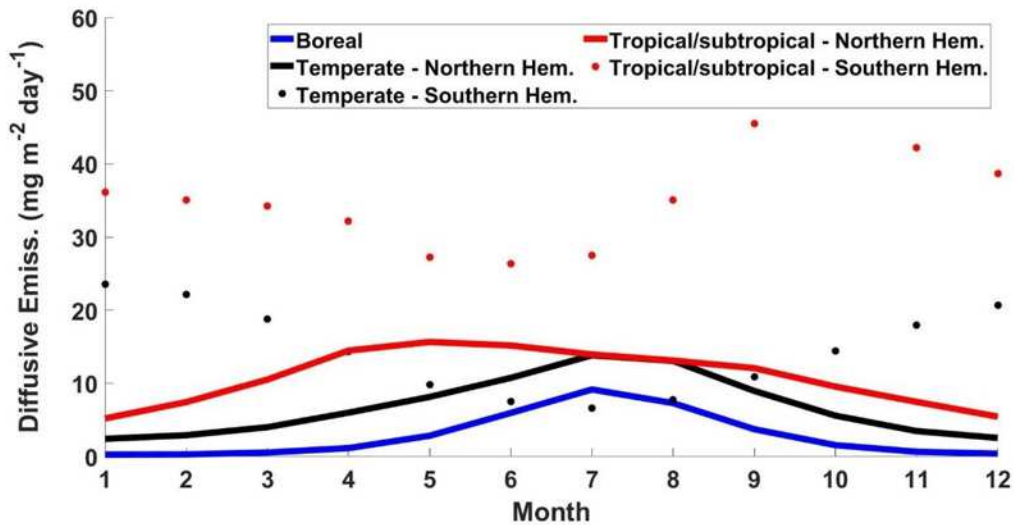
Учет сезонности пузырькового и диффузионного потока по T воздуха:

*Aben, R. C. H., Barros, N., van Donk, E., Frenken, T., Hilt, S., Kazanjian, G., et al. (2017). Cross continental increase in methane ebullition under climate change. *Nature Communications*, 8(1), 1682. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01535-y>

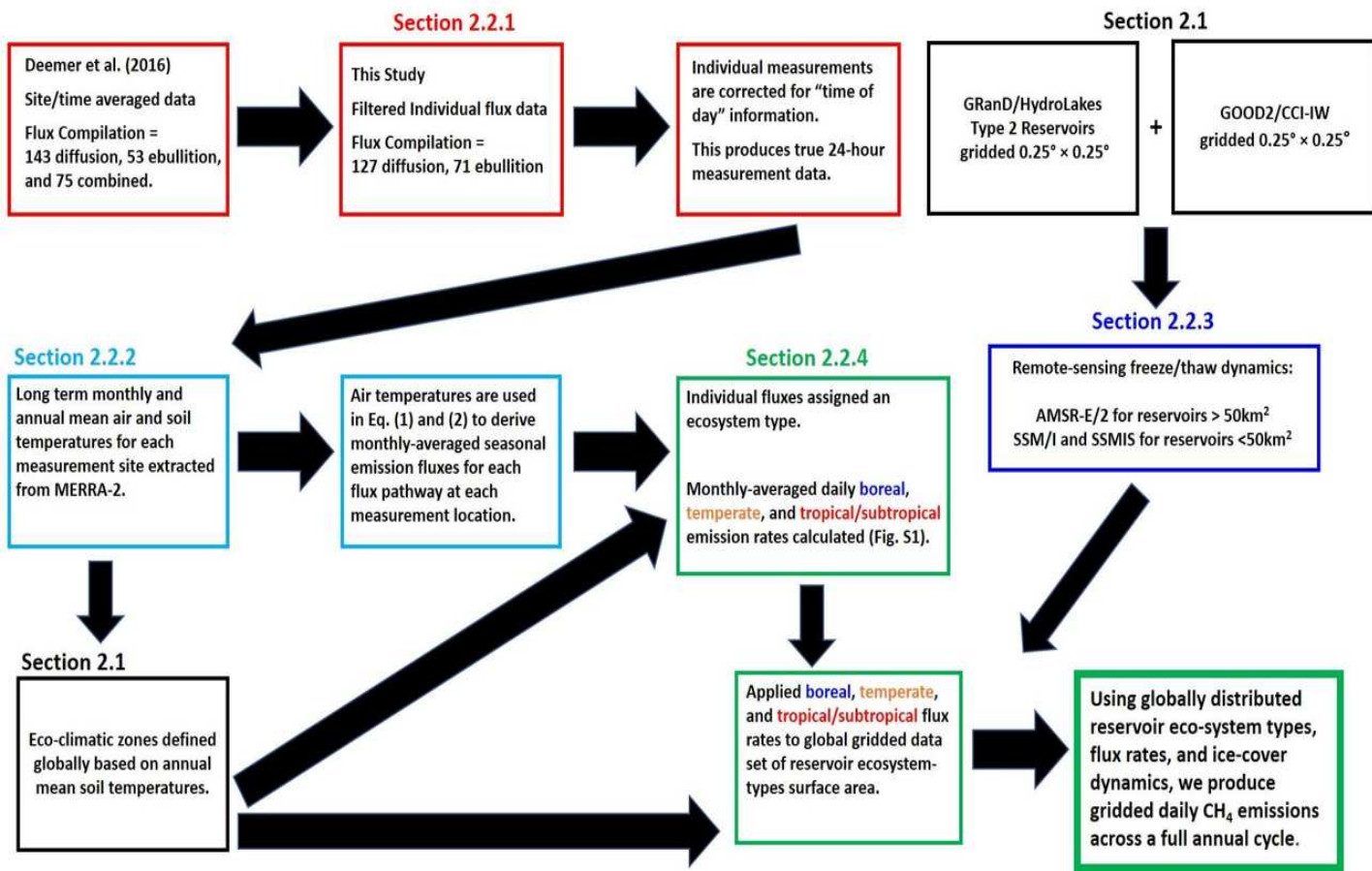
$$E_B = E_{20} \times \theta_s^{(T-20)}$$

$$E_D = 0.023e^{0.124T}$$





Среднемесячные значения потоков метана $\text{mg CH}_4 / (\text{m}^2 \text{сут})$ для различных эко-климатических зон



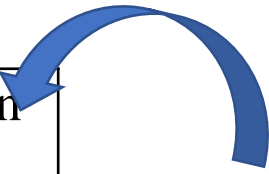
Общая схема определения сезонного изменения потока с суточной поправкой 0,7*

*Sieczko, A. K., Duc, N. T., Schenk, J., Pajala, G., Rudberg, D., Sawakuchi, H. O., & Bastviken, D. (2020). Diel variability of methane emissions from lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 21488–21494. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006024117>



Сопоставление полевых измерений с базой данных

Водохранилище	Месяц проведения измерений	Натурные наблюдения мгСН ₄ *м ⁻² *сут ⁻¹	Значения [Johnson et al, 2021], мгСН ₄ *м ⁻² *сут ⁻¹
Иваньковское	май	4-33	135
	август	4 –440; 1,5-446	240
Цимлянское	апрель	1,3	78
	август	18 - 130	240
Чиркейское	август	0 - 2	240
	ноябрь	0, 3 – 0,9	60
Можайское	июнь	1,3-89; 0,7-9,9	180
	июль	5,3-87; 0,5-23	260
	август	25-325; 3-93; 1-547	240



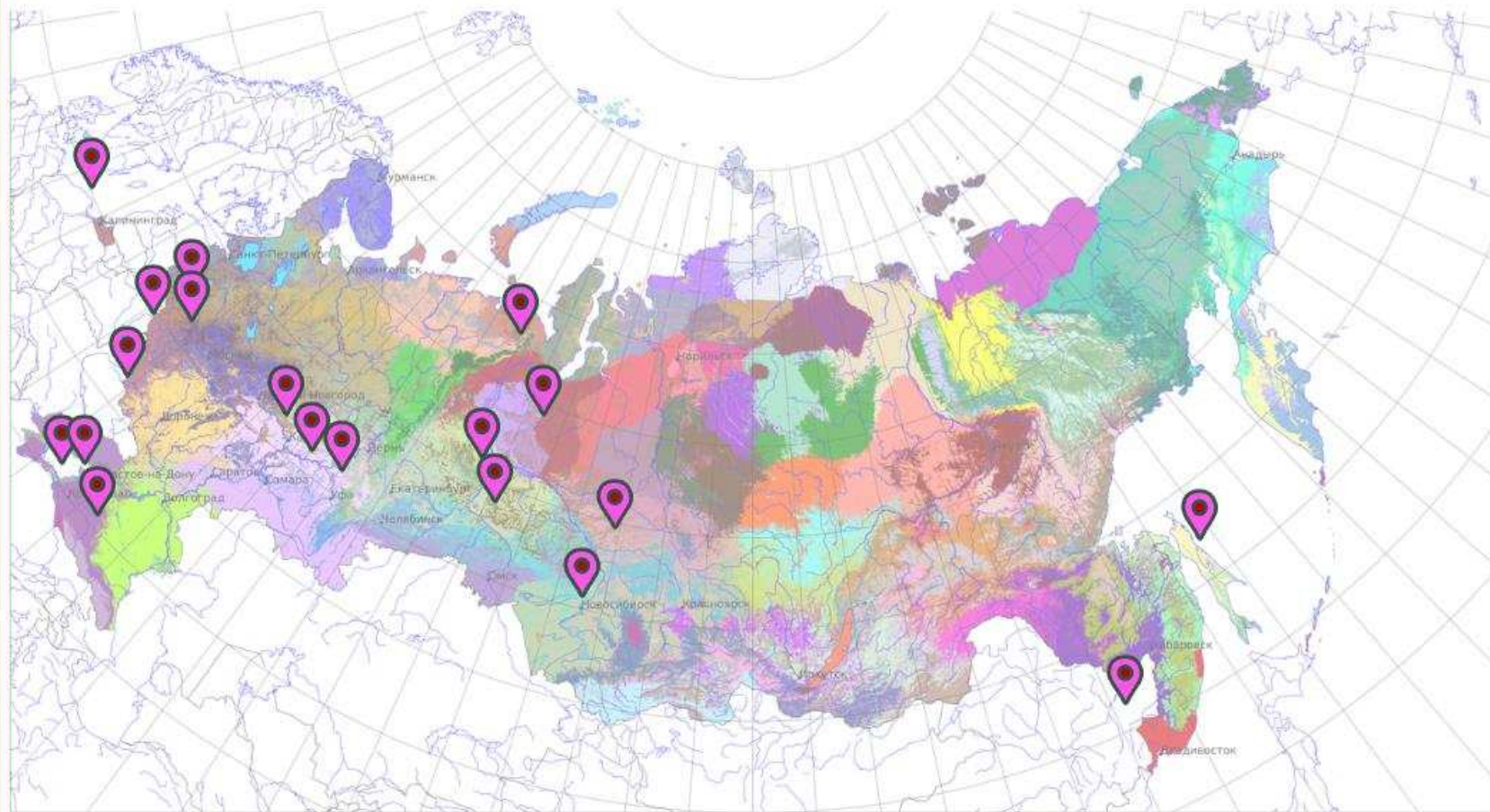
Подход не учитывает пространственную дифференциацию донных отложений в водохранилищах, а также их проточность



Карбоновые Полигоны

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГЛАВНАЯ О ПРОЕКТЕ



Задачи:

изучение баланса парниковых газов в разнотипных экосистемах;
Разработка и тестирование систем и технологий измерений ПГ

19 полигонов

Водные экосистемы (не включая акваторию моря)

- Мухрино
- Цимлянское водохранилище
- Карбон-Поволжье (Саралы)

ВИП ГЗ

Важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»

УТВЕРЖДЕН распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 3240-р

Целью проекта являются создание и развитие Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

Разработчик системы мониторинга
консорциум «РИТМ углерода»:
18 научных центров и институтов РАН,
2 университета
производственное объединение Рослесинфорг.



“Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов” (2021-2024)

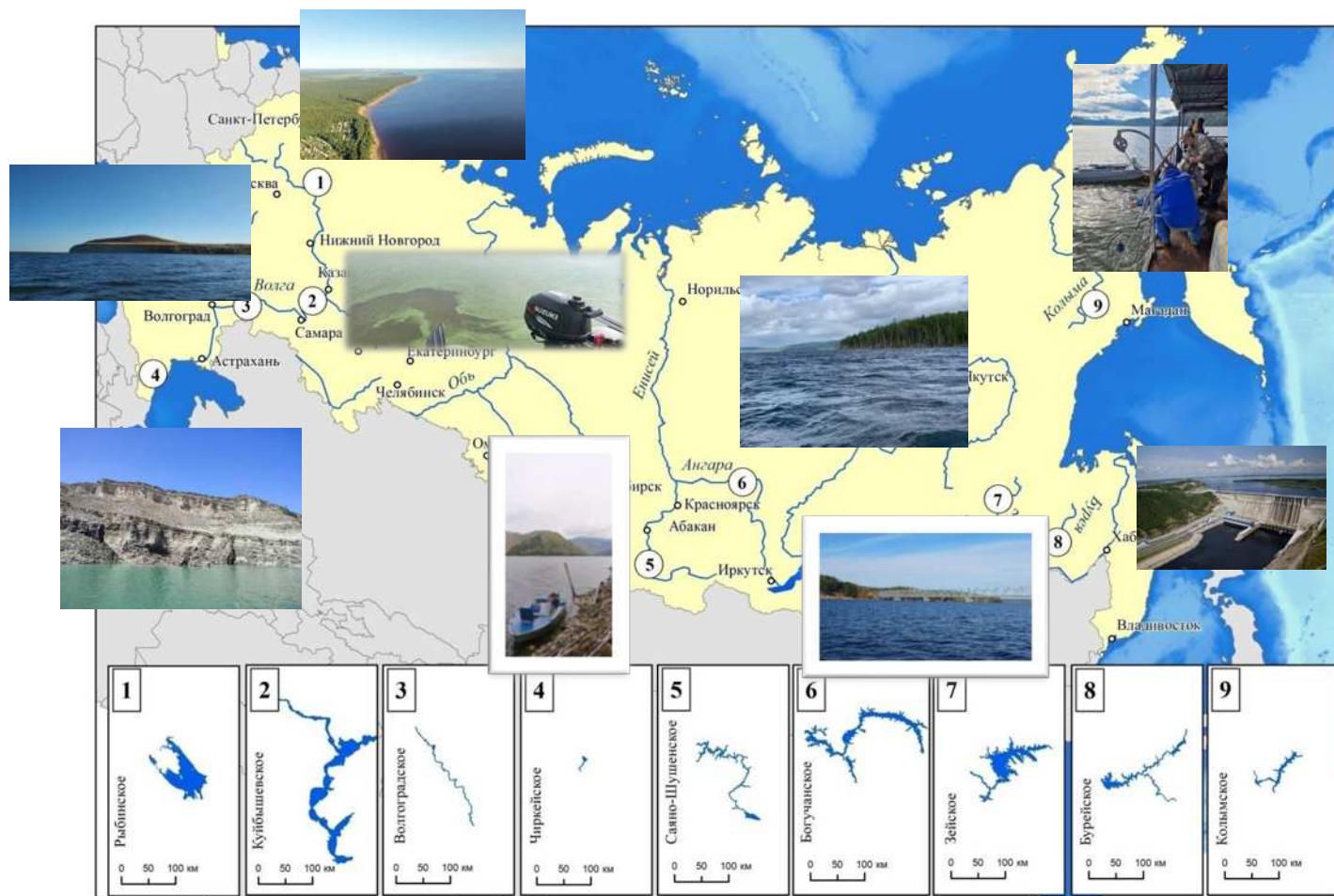
Цели:

1. Измерение баланса парниковых газов.

2. Разработка модели баланса парниковых газов для водохранилищ

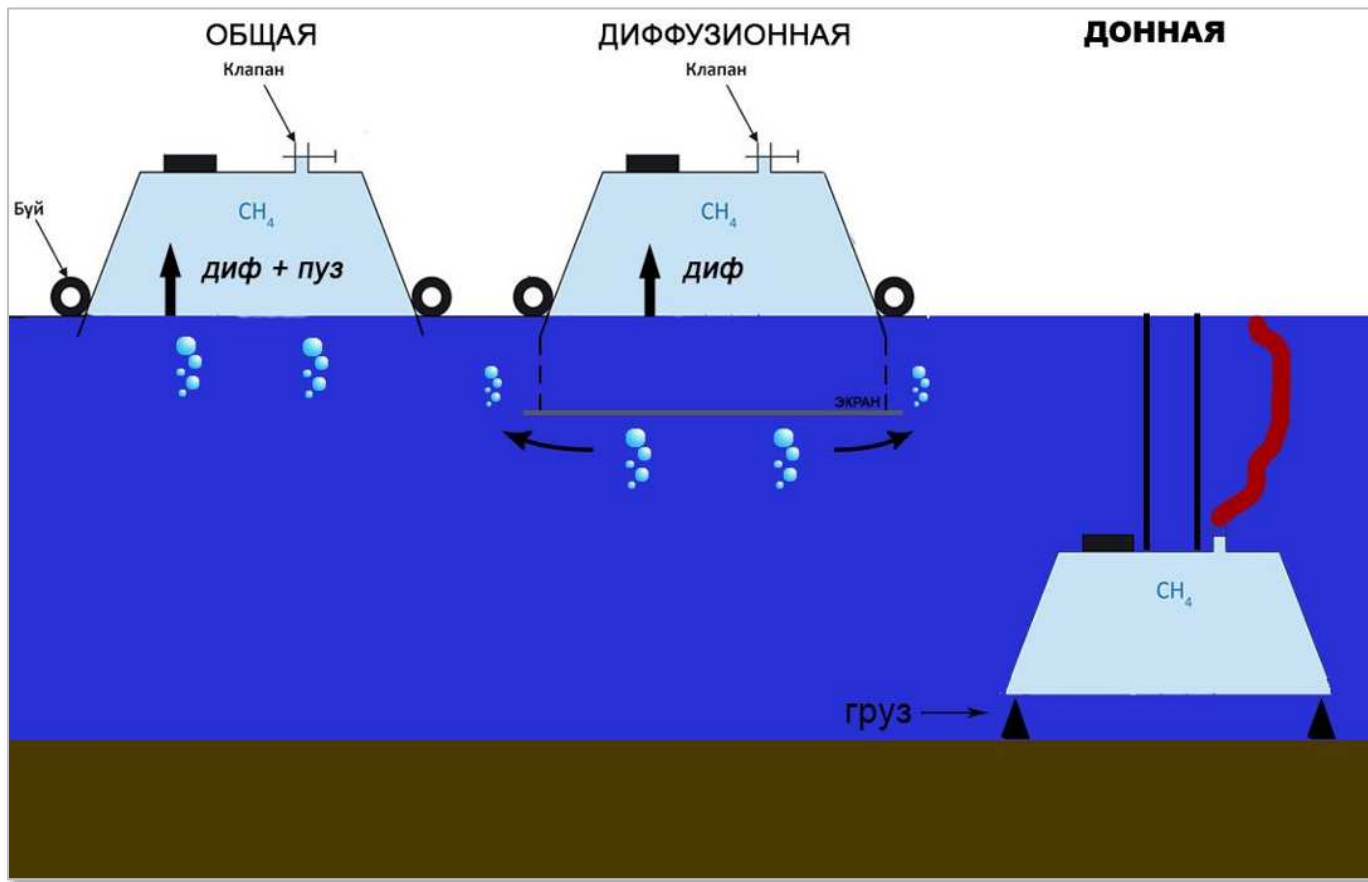
3. Оценка коэффициентов эмиссии парниковых газов для российских водохранилищ.

Иркутское
Братское
Усть-Илимское
Красноярское



Методы исследования

“Плавучие камеры”



“Парофазная дегазация”

Содержание метана в отобранных пробах определялось в лаборатории ИФА РАН и Красновидовской УНБ на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2

Концентрация

$$PV = nRT$$

$$n[\text{ммоль}] = PV/RT$$

$$C[\text{мг}] = n \cdot Mr$$

TVL (диффузионный поток)

$$F = k \cdot (C_{\text{вода}} - C_{\text{возд}})$$

$$k = k_{600} \cdot (Sc/600)^{-x}$$

$$k_{600} = f(U_{\text{ветер}})$$

$$x = 0,66 (U < 3 \text{ м/с}); 0,5 (U > 3 \text{ м/с})$$

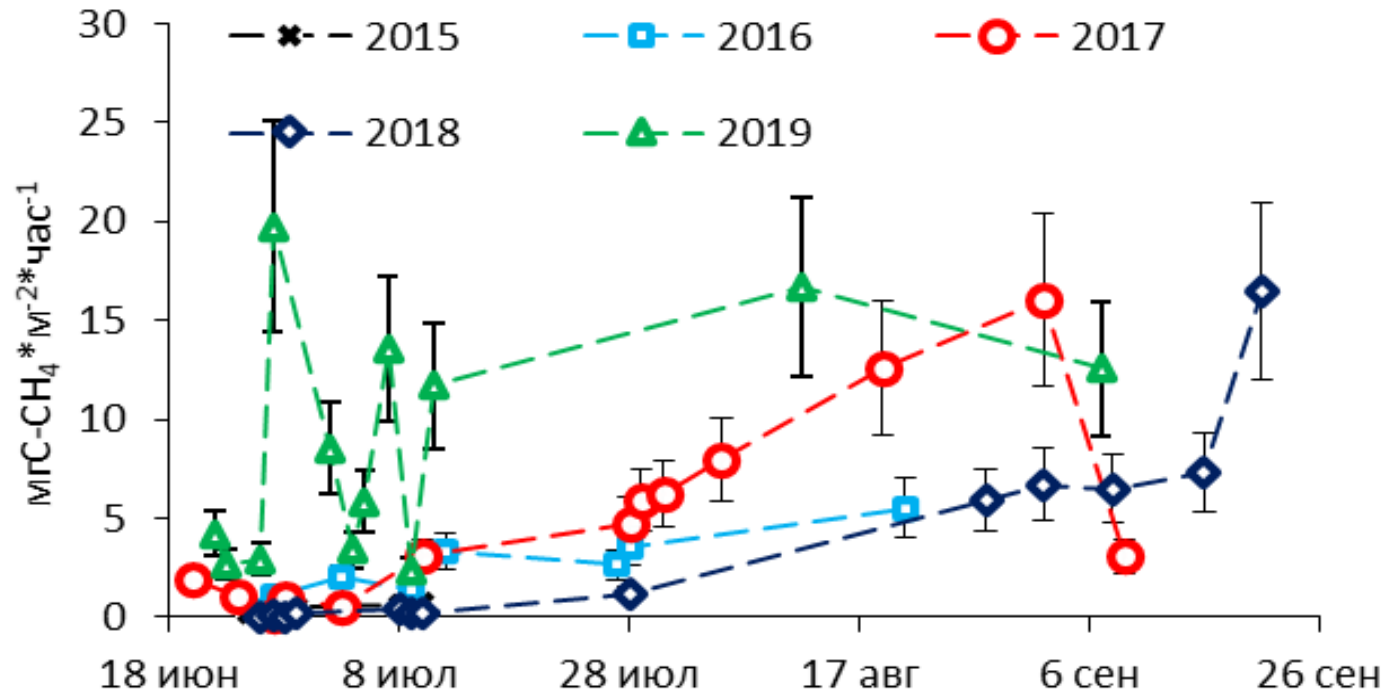
Камеры

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

- ❖ Общая
- ❖ Диффузионная
- ❖ Донная

Ограничение метода: частота измерений

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (пример – Можайское вдхр)



Удельный поток метана в атмосферу в центральном районе Можайского водохранилища по данным измерений «плавучими камерами»

Определяющие факторы для рейдовой вертикали:

- Погодные условия,
- в т.ч. колебания давления
- Стратификация
- Уровень воды



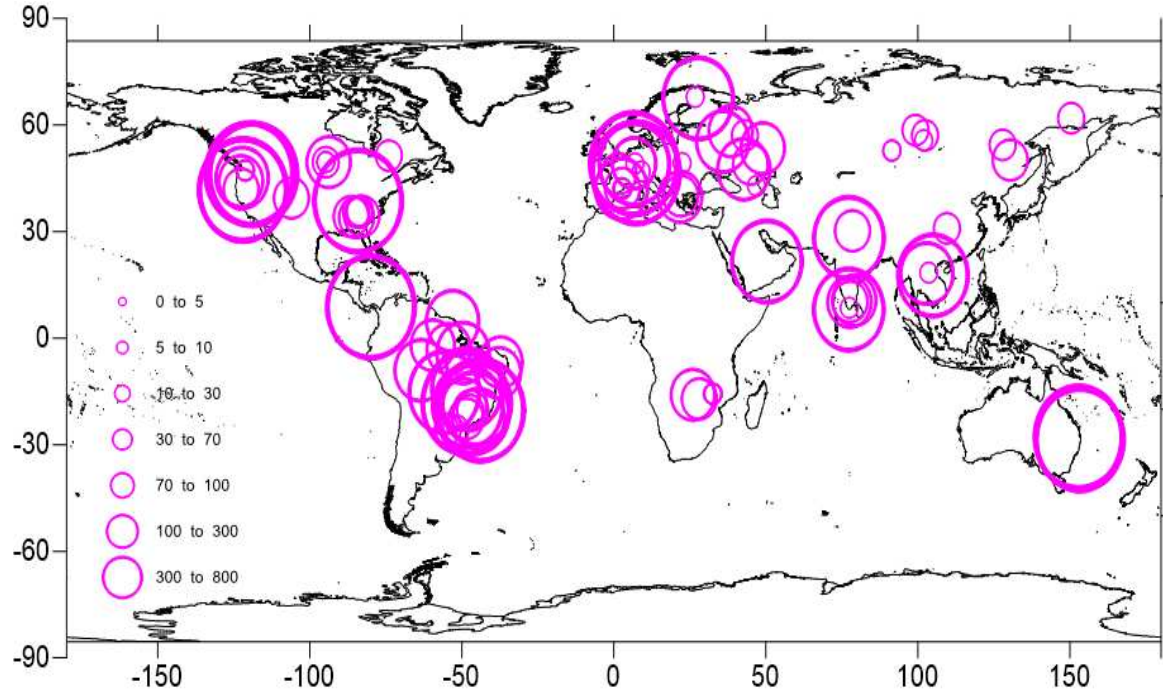
Метод ковариации пульсаций

Ограничение метода:

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



Сравнение изученных в проекте ПАО РУСГИДРО вдхр. с мировыми данными

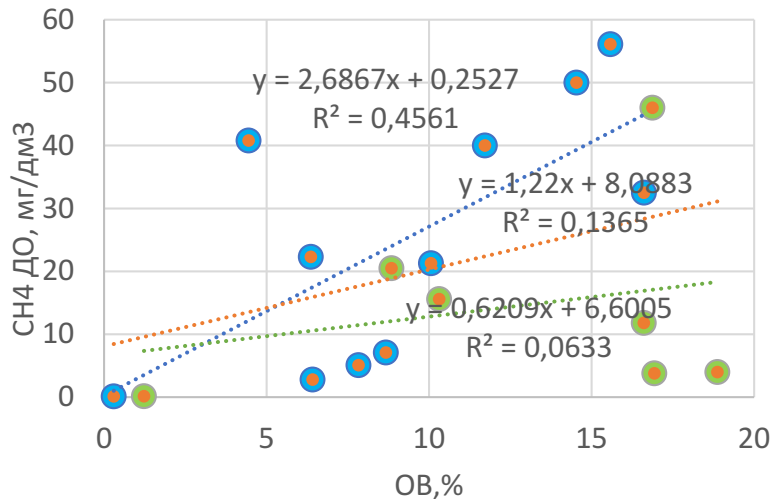


Среднегодовой поток $\text{mgCH}_4/\text{m}^2 \text{сут}$

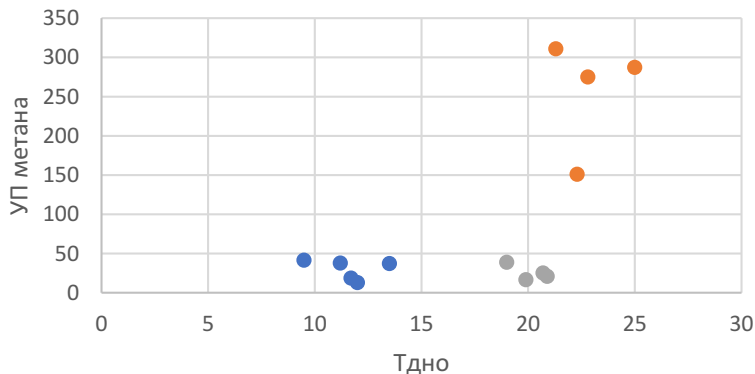
Водохранилище	УП метана с поверхности, $\text{mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{сут}^{-1}$	УП метана при весеннем выбросе, $\text{mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{сут}^{-1}$	Дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф, $\text{kgCH}_4 \text{ сут}^{-1}$
Рыбинское	27.1	869	145
Бурейское	10.6	1921	10.3
Волгоградское	18.2	107	174
Куйбышевское	10.2	0.02	31.5
Чиркейское	5.88	36.8	7.32
Зейское	1.40	519	1.04
Колымское	0.38	959	0.397
Богучанское	1.68	82.1	1.51
Саяно-Шушенское	9.67	2713	8.63

Водохранилище	Эмиссия метана в углеродном эквиваленте, 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	0.04	0.06	0.07	0.06
Зейское	1.08	2.77	1.51	1.79
Колымское	0.19	0.38	0.33	0.30
Богучанское	1.39	0.73	1.60	1.24
Саяно-Шушенское	1.58	1.75	1.69	1.67

Многофакторность формирования потока метана – причина проблем с простыми прогнозами

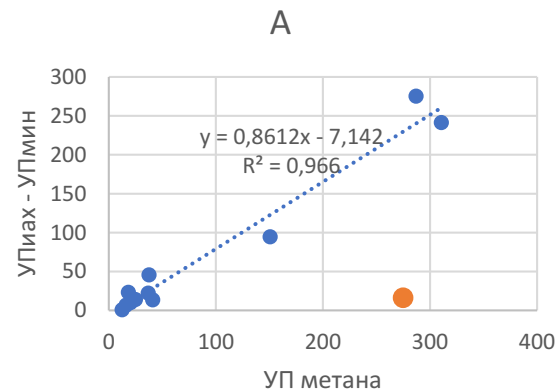


Зависимость содержания метана от ОВ на станциях съемок Ивановковского в-ща 2024 (зеленая – 31.05-1.06, синяя 3-4.08, оранжевая – за обе съемки).

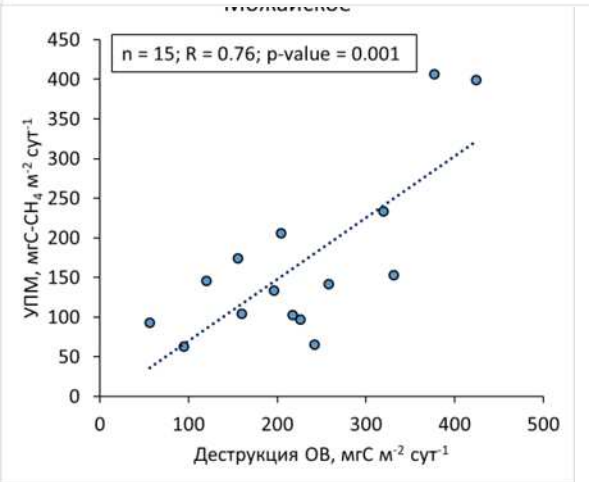
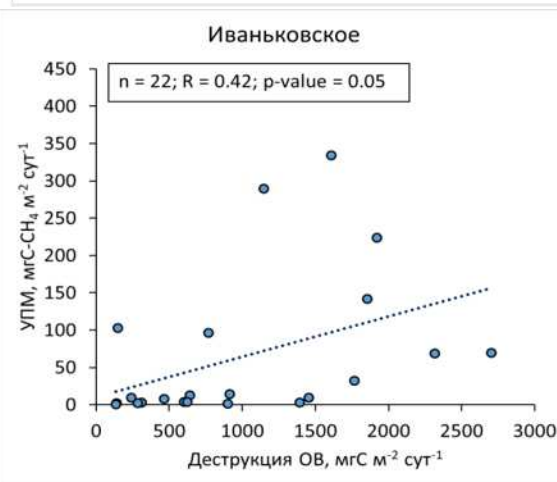
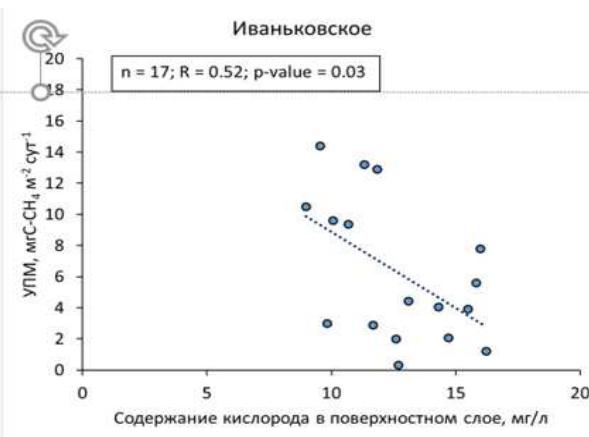
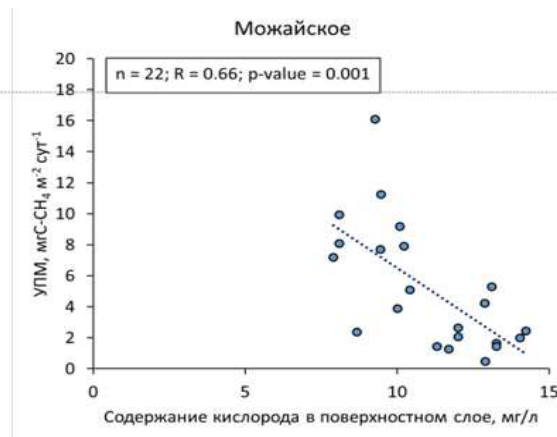
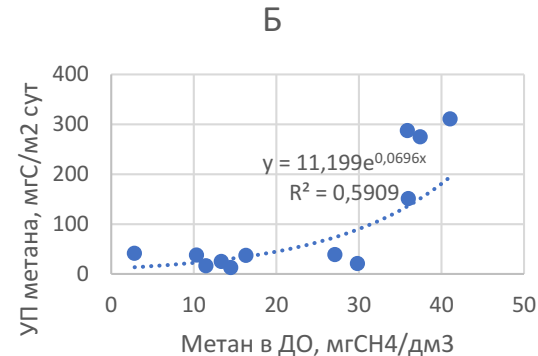


Зависимость УП метана от температуры придонного слоя (2.05-6.06 – синие, 14.06-4.07 – серые, 11.07-1.08 – оранжевые).

Разная теснота связи процессов в разных водоемах



Зависимость изменчивости УП метана от его величины (А) и зависимость УП метана от его содержания в верхнем слое ДО.



**Трудности измерения весеннего и осеннего выброса
Требуется использовать математическое моделирование**

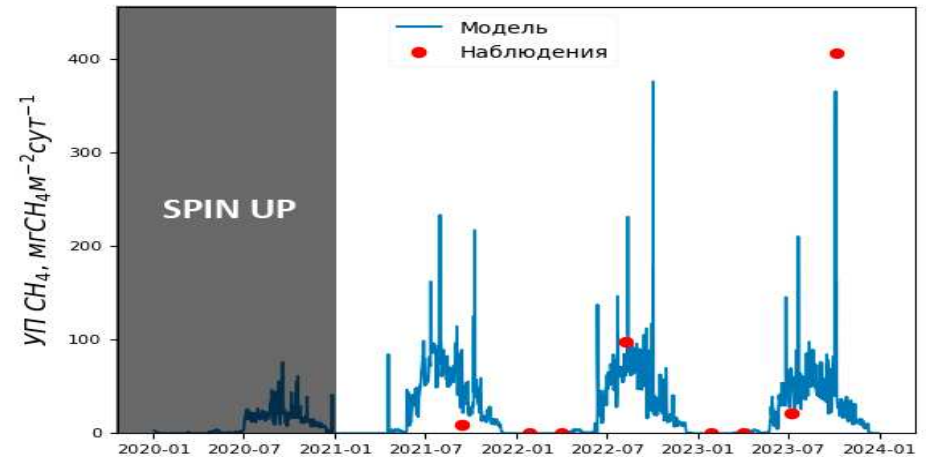
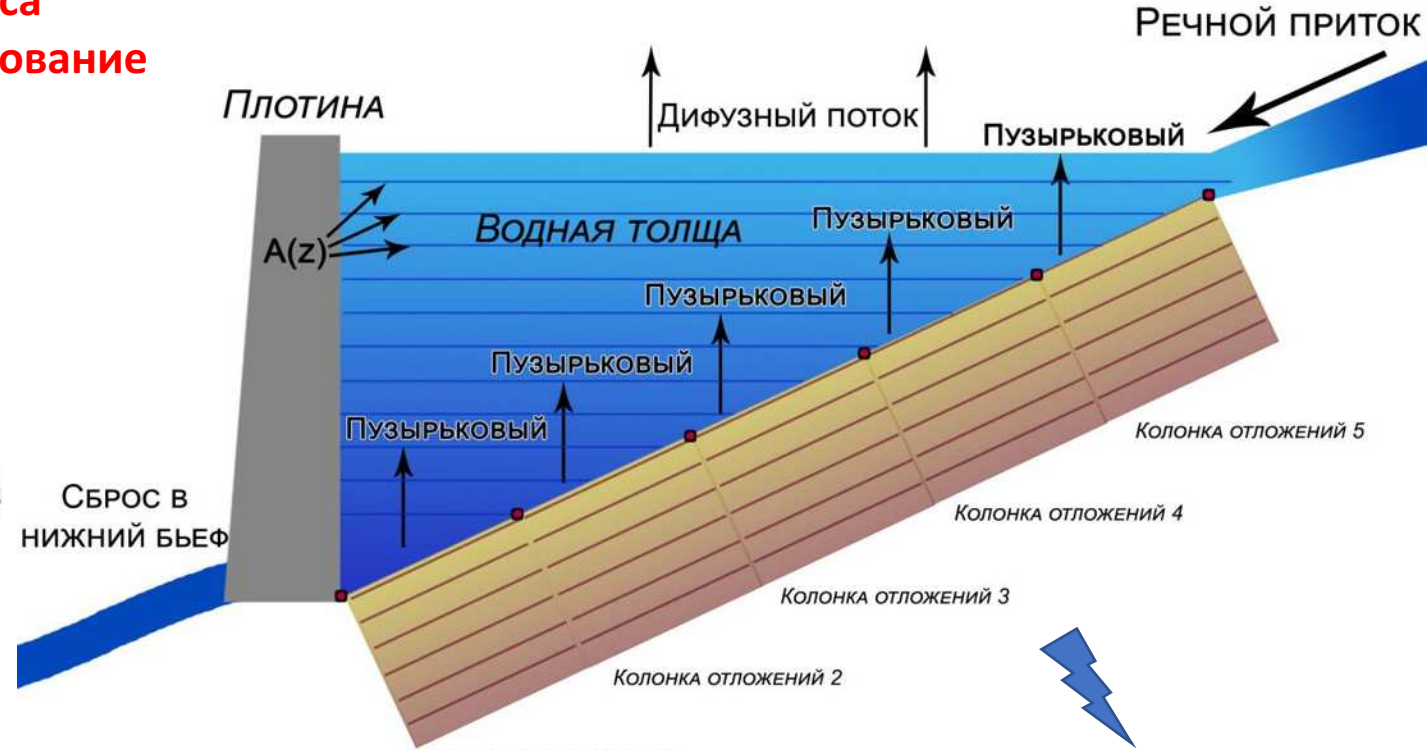
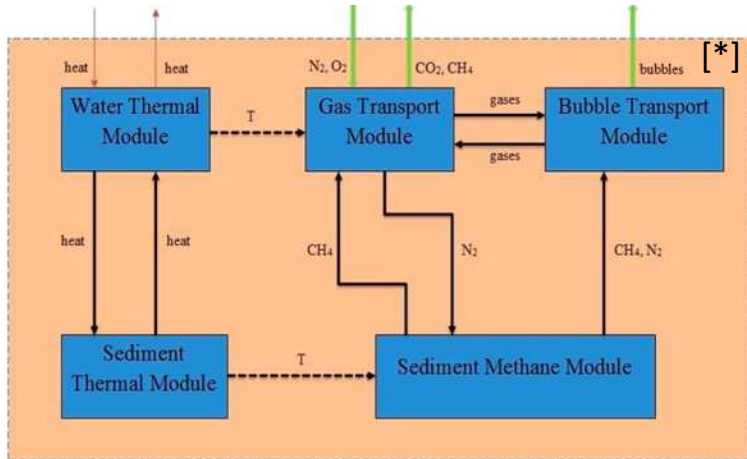
❖ **Одномерная термогидродинамическая модель с включением биохимического блока (НИВЦ МГУ В.М. Степаненко)**

Метан в донных отложениях

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(k_{CH_4} \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial z_s} \right) + P_{soil,CH_4} - E_{soil,CH_4} - O_{soil,CH_4}$$

Метан в водной толще

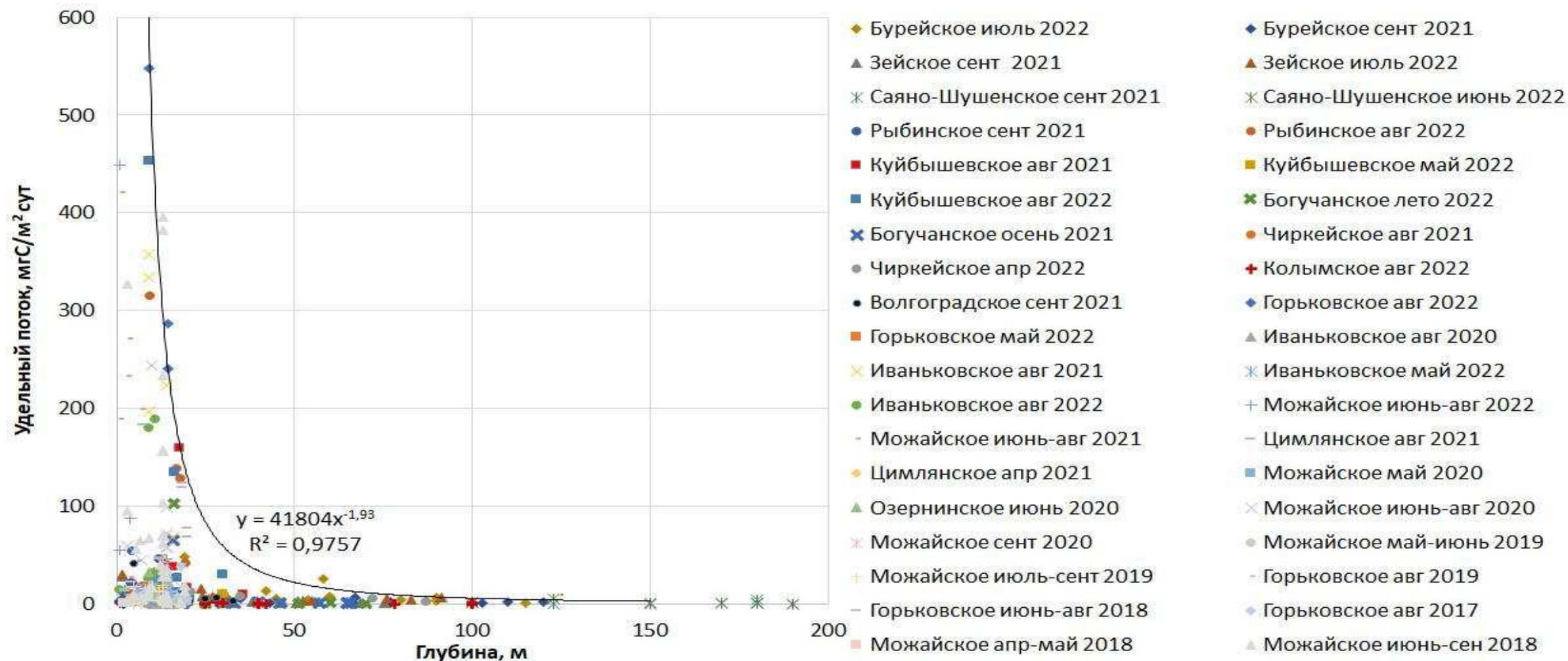
$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = Dif_A(C_{CH_4}) + \frac{F_{CH_4,b} dA}{A} \frac{dA}{dz} + B_{CH_4} - O_{CH_4}$$



Неучет выбросов – до нескольких тонн С с км²

* Tan, Z. & Zhuang Q. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions // Environment Research Letters. – 2015. – Vol. 10. – pp. 1-10.

Результаты



Зависимость удельного потока метана с районов разнотипных водохранилищ разной глубины

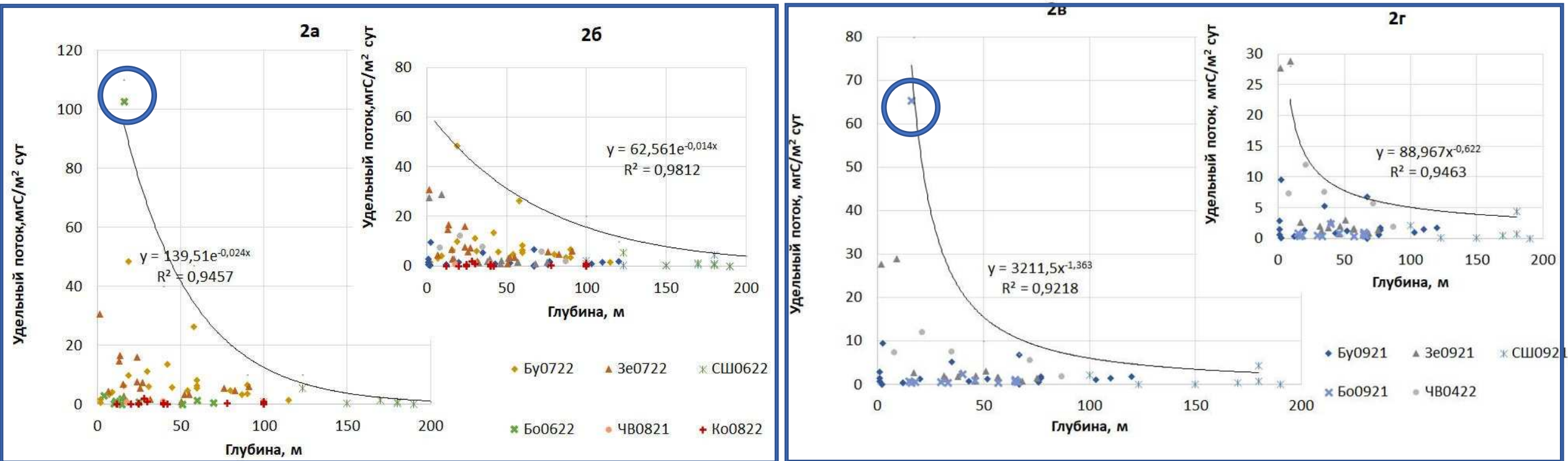
В-ще	Н _{мах} , м
Чиркейское	120
Бурейское	130
Колымское	120
Зейское	100
Богучанское	74
Саяно-Шушенское	220

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

Водохранилища были сгруппированы по признаку максимальной глубины

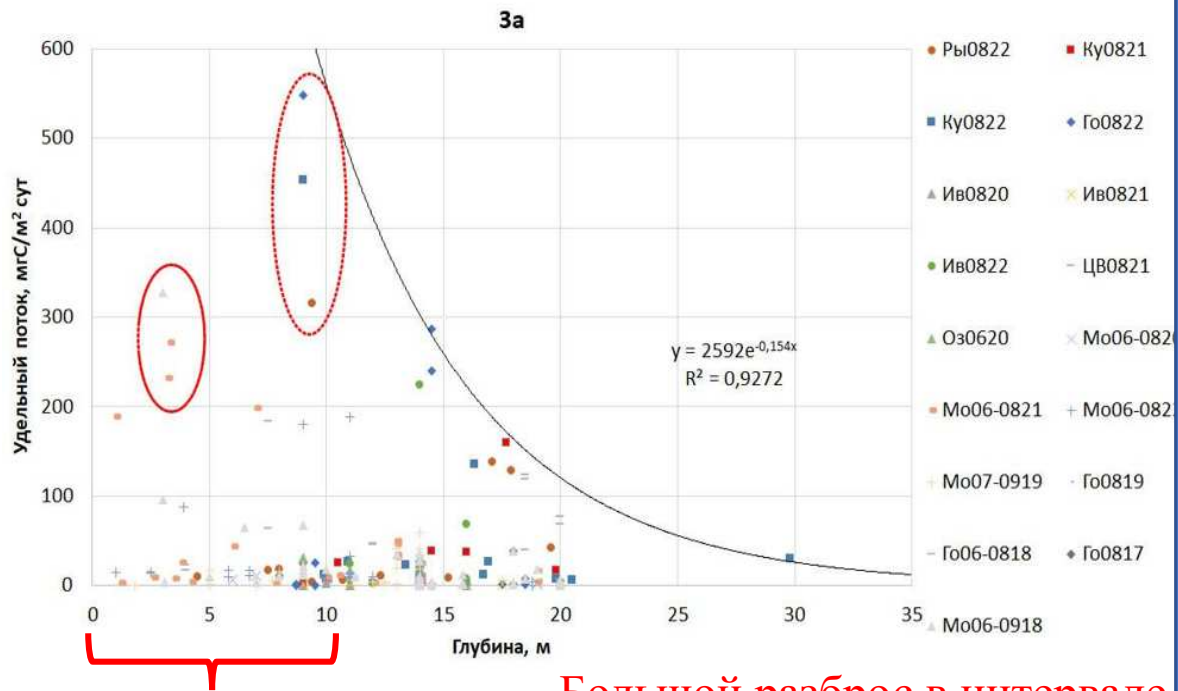
- ✓ **Глубина** водоема оказывает значительное влияние на его термический и кислородный режим. Глубоководные водохранилища расположены в горных районах, обычно имеют олиготрофный или мезотрофный статус
- ✓ Равнинные водохранилища обычно более мелководны с максимальной глубиной порядка 30-40 м, что обуславливает 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

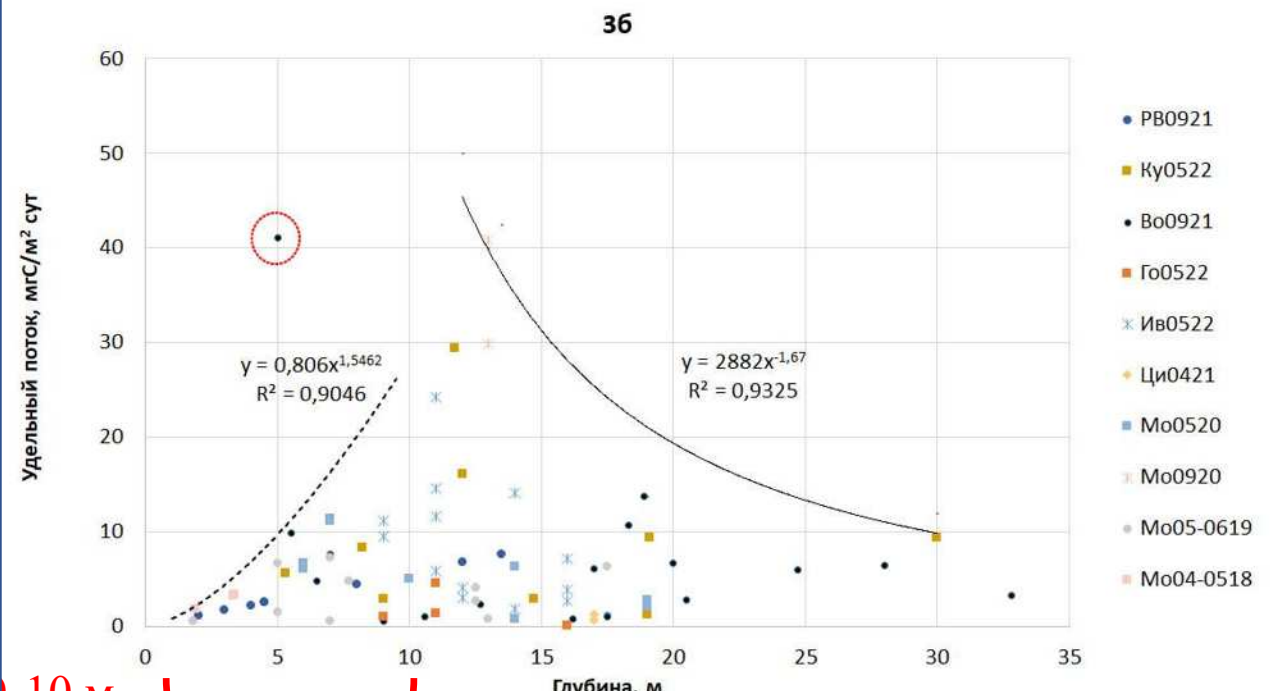


Зависимость удельного потока метана от глубины с районов глубоководных водохранилищ: 2а – в периоды стратификации, 2в – при отсутствии стратификации, 2б и 2г – без учета локального максимума в Ковинском плесе Богучанского водохранилища (затопленное болото).

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



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 связана также и с различным составом донных отложений и наличием/отсутствием 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

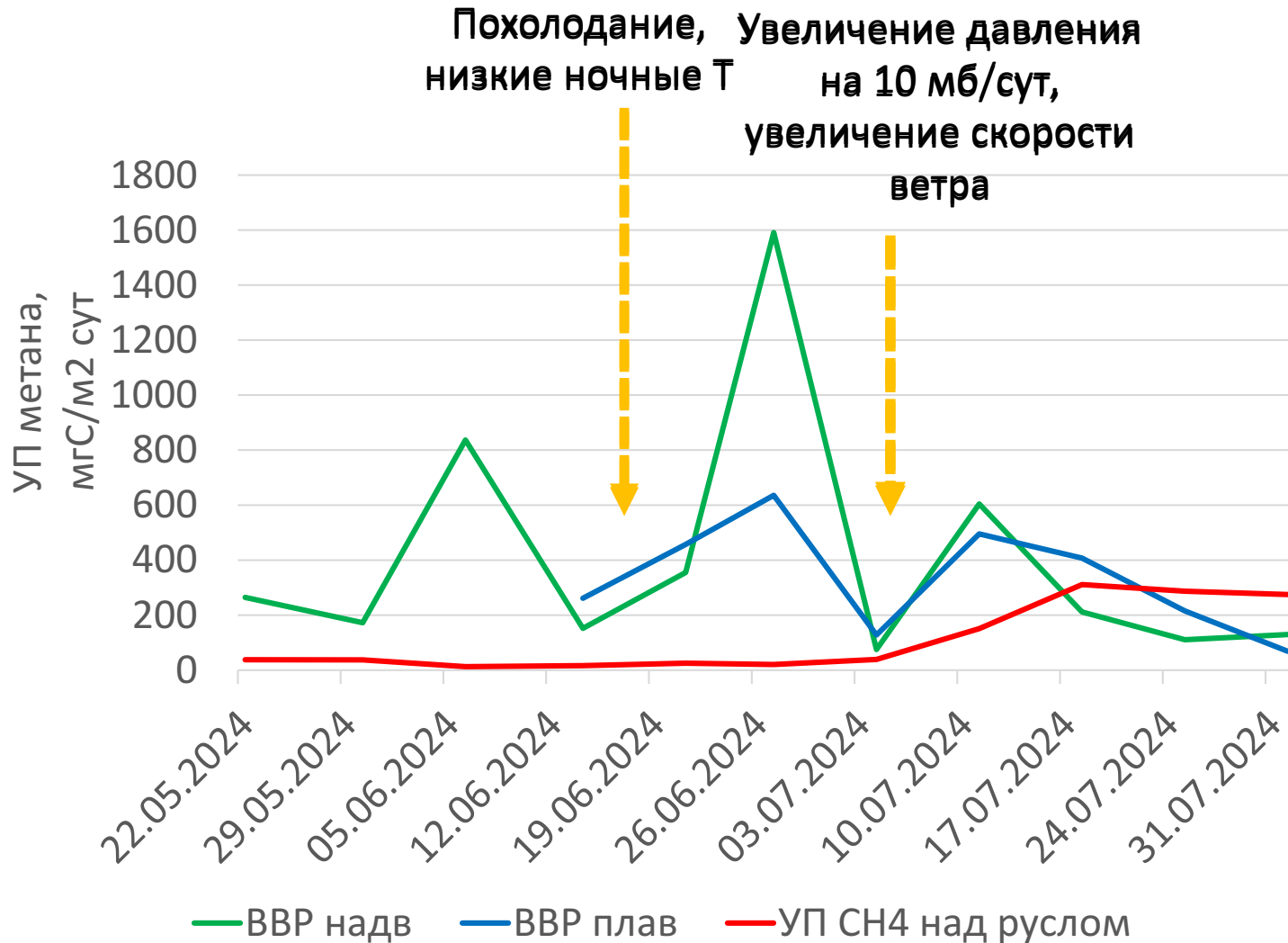


Уруть водная

128-146 мгС/м² сут

УП метана над разнотипными макрофитами в устьевом заливе р. Донховки Иваньковского в-ща (2024)

Значительные колебания на мелководье - влияние погоды

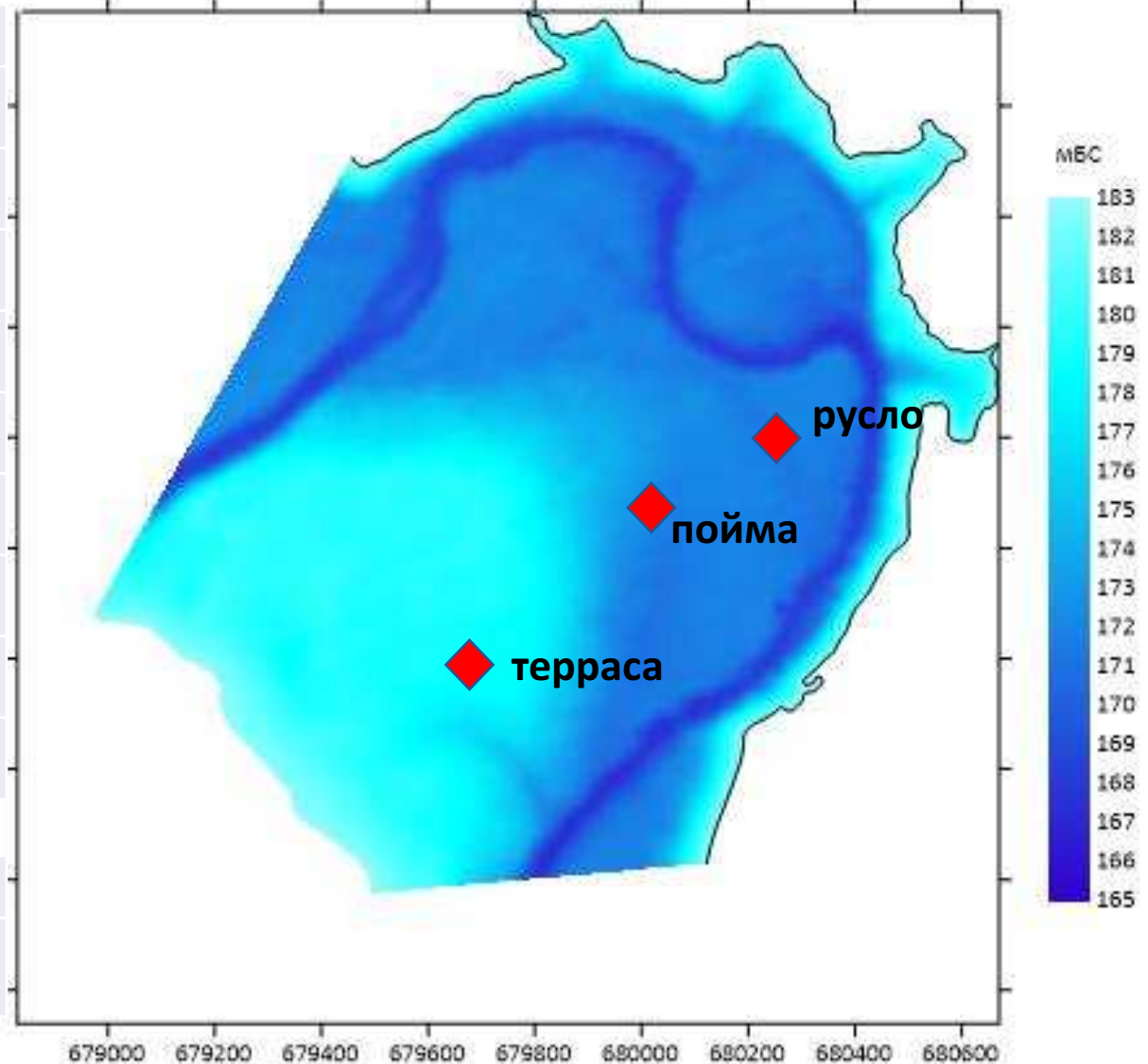


Площадь зарастания 6-12%

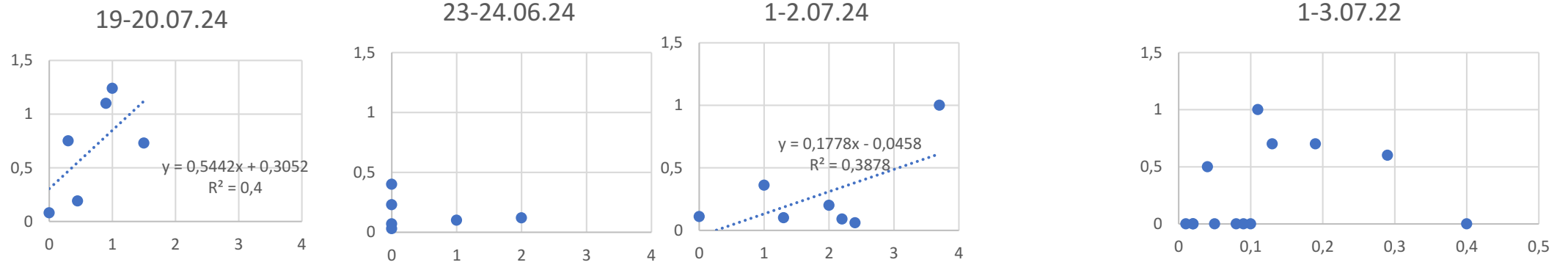


УП метана над морфологическими частями Красновидовского плеса Можайского в-ща (2024)

	мгС/м ² сут	русло	пойма	терраса
30 мая	мин	5,2	8,6	43,2
	макс	34,8	18,3	143
	ср	17,5	13,2	88,7
17 июля	мин	1,1	1,5	5,8
	макс	2,3	1,6	13,6
	ср	1,6	1,5	10,6
13 сентября	мин	139	7,5	2,3
	макс	183	42	27,5
	ср	161,4	24,9	14,9
30 мая	ОВ%	14,4	5	3,4
13 сентября		12,8	6,8	1,3

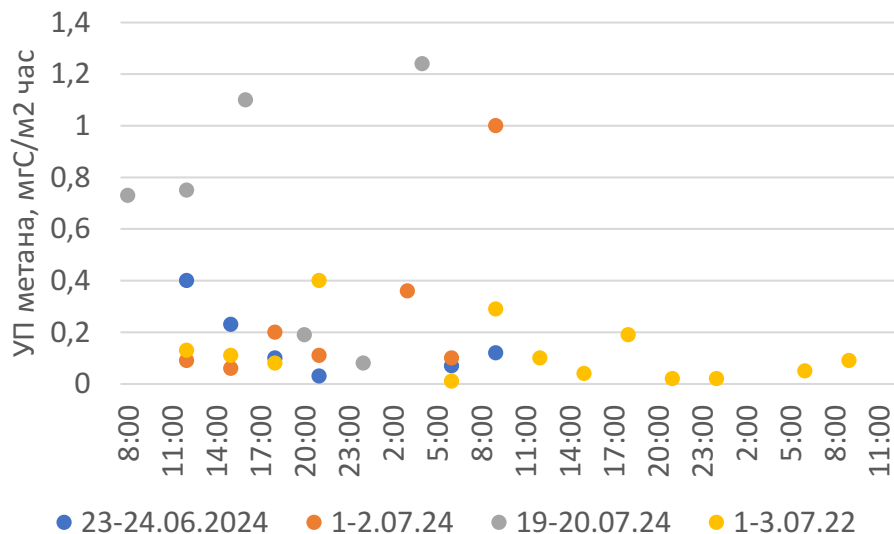


Суточный ход УП метана (Можайское в-ще)



Влияние бризовой циркуляции

Отсутствие тесной связи из-за преобладания пузырькового потока



Дата	Поток ср. за весь период	Поток ср. за дневной интервал 12-18 ч
23-24.06.2024	0,16	0,24
1-2.07.24	0,27	0,13
19-20.07.24	0,68	0,93
1-3.07.22	0,27	0,48
	0,345	0,445
Коэф. от дневных наблюдений к суточным	0,8	

Выводы

- ✓ Значительная пространственно-временная изменчивость потока метана с водохранилищ
 - ✓ Технические трудности применения метода измерений eddy-covariance
- ✓ С измерением потока метана методом камер в штормовую погоду (максимальные потоки)
 - ✓ Зависимость потока метана от погодных условий конкретного года
 - ✓ Короткие ряды наблюдений для определения характерных средних значений
 - ✓ Возможность дополнения натуральных измерений данными модельных расчетов
 - ✓ Отсутствие стандартного оборудования

Перспективным представляется изучение потока метана с зарослей укорененных и плавающих макрофитов, с зоны осушки, выделение участком с антропогенными нарушениями.