



РусГидро



# Оценка эмиссии метана из разнотипных водохранилищ России с помощью модели LAKE 3.2 с привлечением данных натурных экспериментов

---

ЛОМОВ В.А., СТЕПАНЕНКО В.М., РОМАНЕНКО В.А., РЕПИНА И.А.,  
ГРЕЧУШНИКОВА М.Г., ГОРИН С.Л., АГАФОНОВА С.А., ТЕРСКИЙ П.Н.

Работа выполнена в рамках договора 1010-416-021 между ИФА им. А.М. Обухова РАН и ПАО «РусГидро»

Томск - 2024

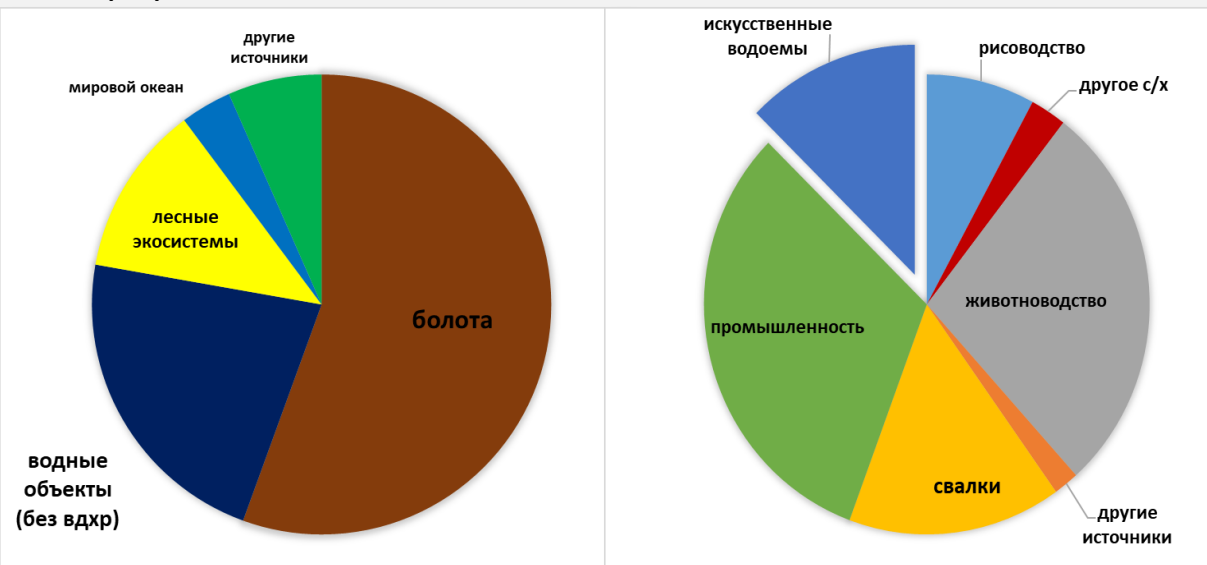
# Актуальность

- ❖ Метан – третий по значимости парниковый газ в атмосфере (ПГП = 28)
- ❖ С учетом разницы концентраций и ПГП метана, его влияние на глобальный климат составляет около 20%

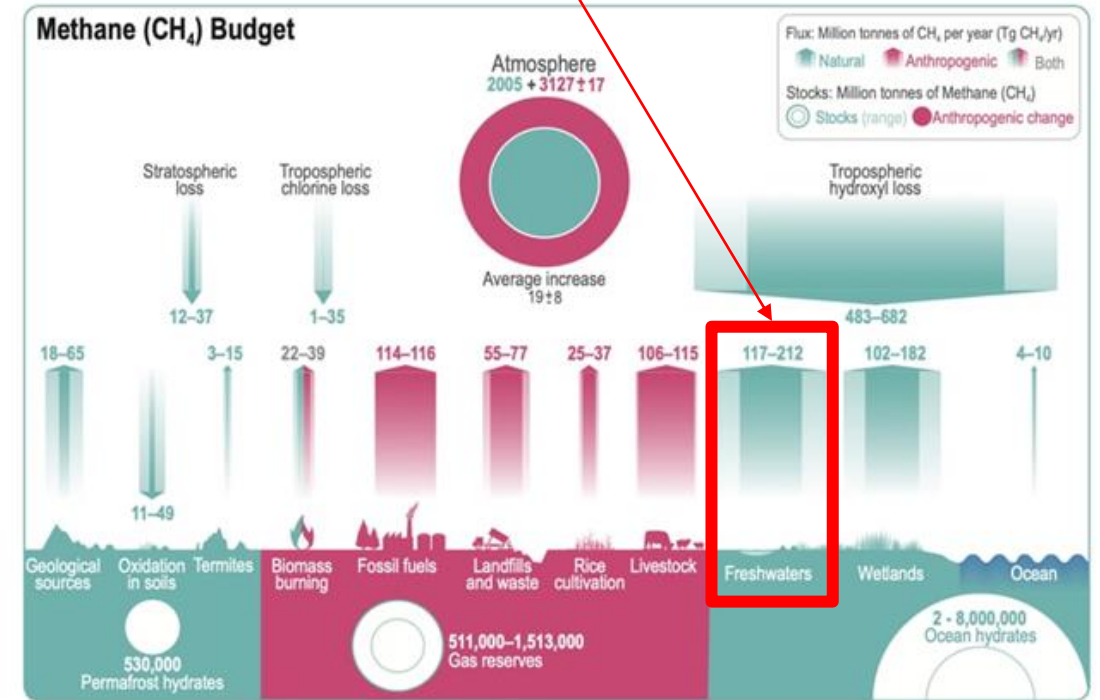
Saunois, Bousquet et. al. (2016)

Природные – 333 Тг/год

Антропогенные – 384 Тг/год

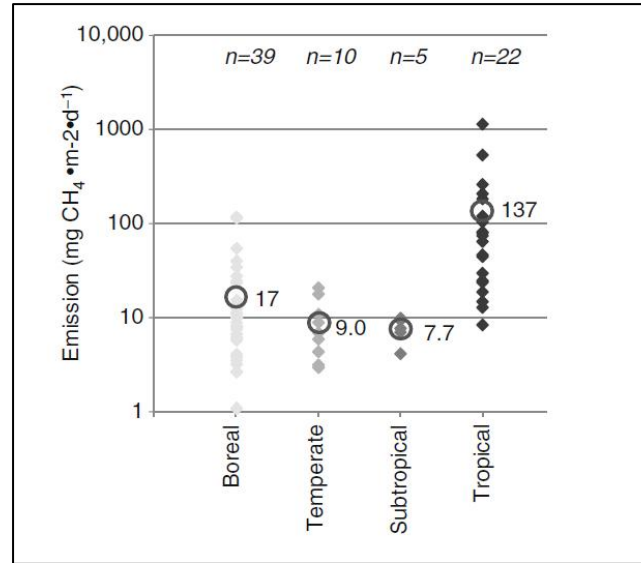


117 – 212 млн тонн  $\text{CH}_4$ /год



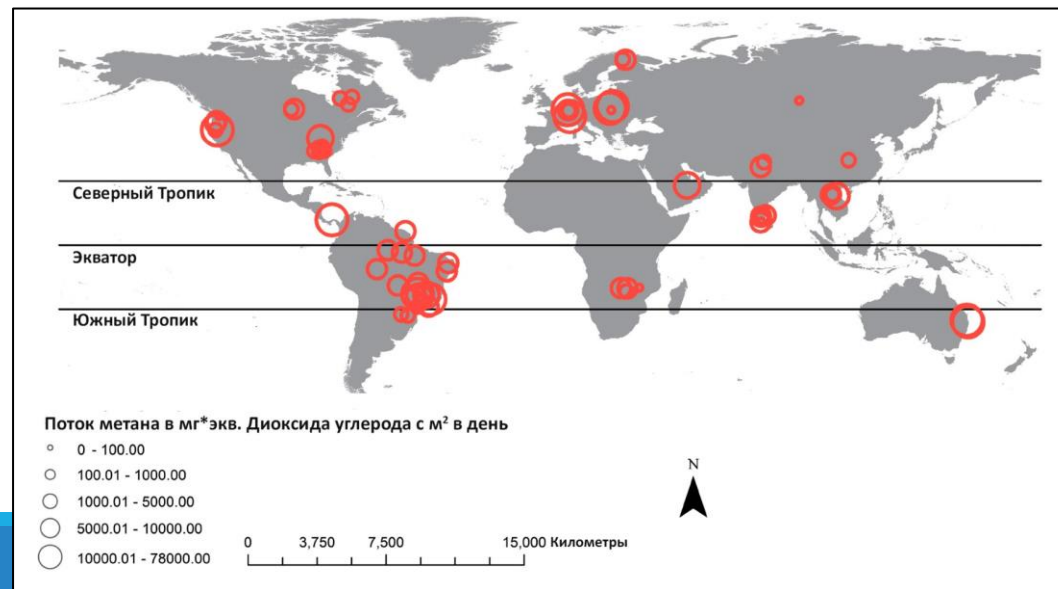
# Важность оценки эмиссии метана из искусственных водоемов

- ❖ Гидроэлектроэнергия долгое время считалась абсолютно «зеленой» энергией, однако это не совсем так из-за выбросов парниковых газов, особенно метана
- ❖ Согласно Парижскому соглашению, всё производство электроэнергии должно быть инвентаризировано по сопутствующим выбросам парниковых газов. В том числе и ГЭС
- ❖ При отсутствии данных наблюдений, водохранилищам присваиваются значения коэффициентов выбросов ПГ ( $\text{кг га}^{-1} \text{год}^{-1}$ ) характерные для климата водоема, которые, как правило, отличаются реальных выбросов



**Оценки суммарной эмиссии с водохранилищ:**

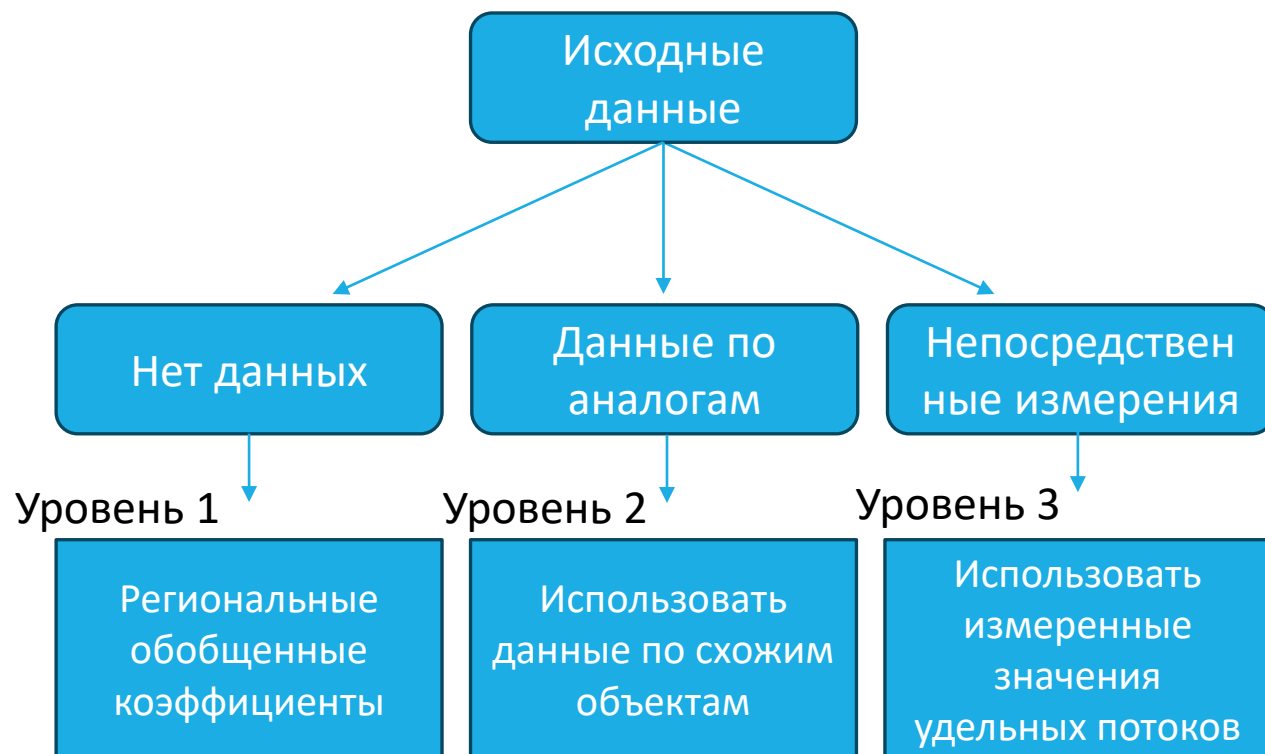
|               |                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------|
| <b>103</b>    | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Bastviken et.al., 1998], |
| <b>69</b>     | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [St Louis et. al. 2000],  |
| <b>95-122</b> | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Giles J., 2006],         |
| <b>2-4</b>    | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Lima I. et. al., 2008 ], |
| <b>4,8</b>    | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Varis O. et. al., 2012], |
| <b>18,7</b>   | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Li et.al., 2014],        |
| <b>17,9</b>   | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Deemer et.al., 2017],    |
| <b>10,1</b>   | Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Johnson et.al., 2021]    |



# Методика, предлагаемая МГЭИК для оценки эмиссии метана с водохранилищ

## ❖ **Уровни (tiers)** – уровни методологической сложности

- ❖ Уровень 1: базовый
- ❖ Уровень 2: продвинутый
- ❖ Уровень 3: наиболее сложный с точки зрения трудности и потребности в данных



# Цели и задачи работы

---

**Цель работы:** Оценить величину годовой эмиссии метана из 9 разнотипных водохранилищ России по данным наблюдений и математического моделирования

## **Задачи:**

- ❖ Провести полевые кампании комплексных измерений удельных потоков метана из водохранилищ
- ❖ По данным натурных наблюдений провести калибровку модели LAKE 3.2
- ❖ По результатам моделирования оценить величину годового выброса метана из водохранилищ

# Объекты исследования

---

Богучанское

Бурейское

Волгоградское

Зейское

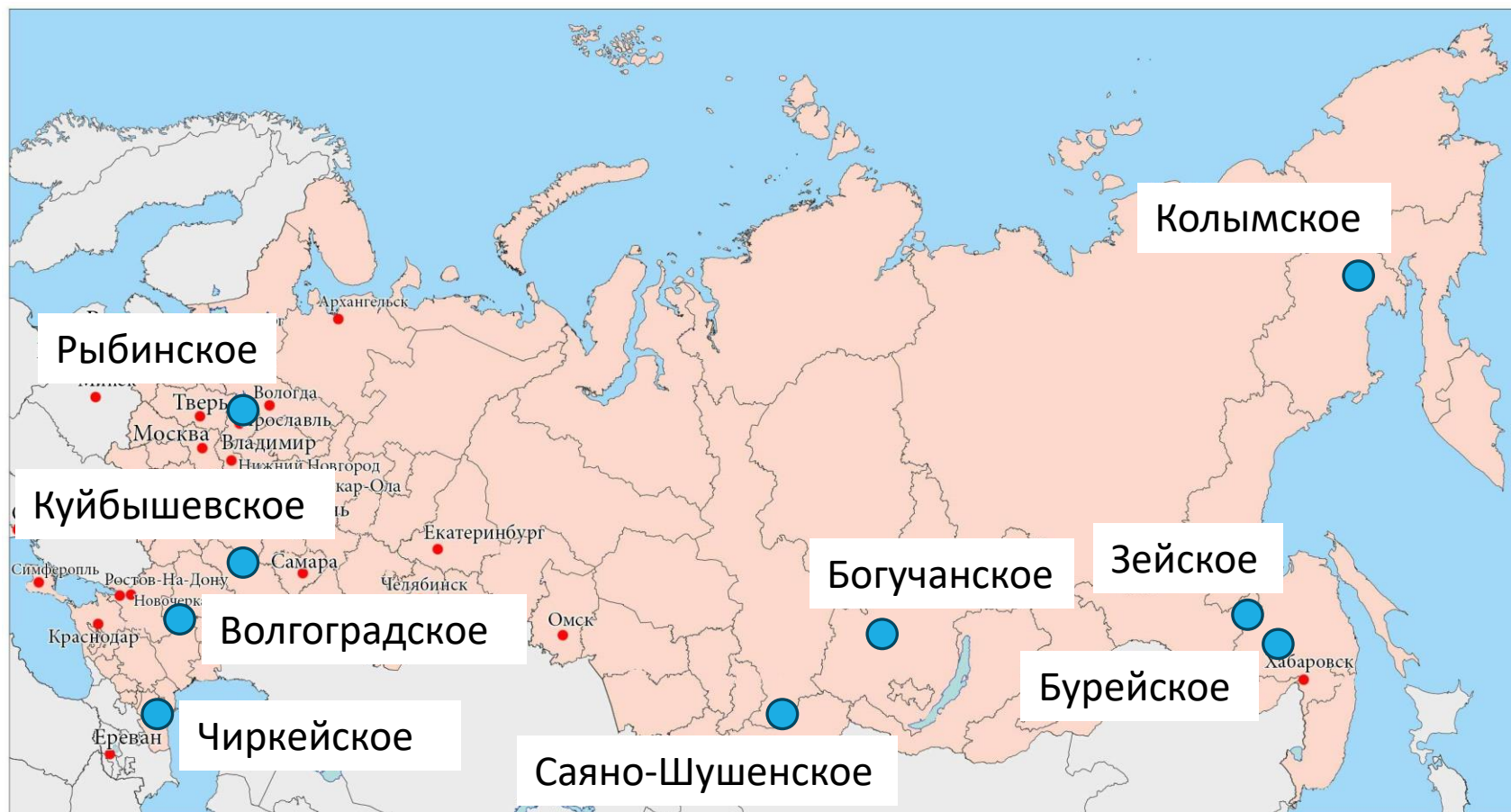
Колымское

Куйбышевское

Рыбинское

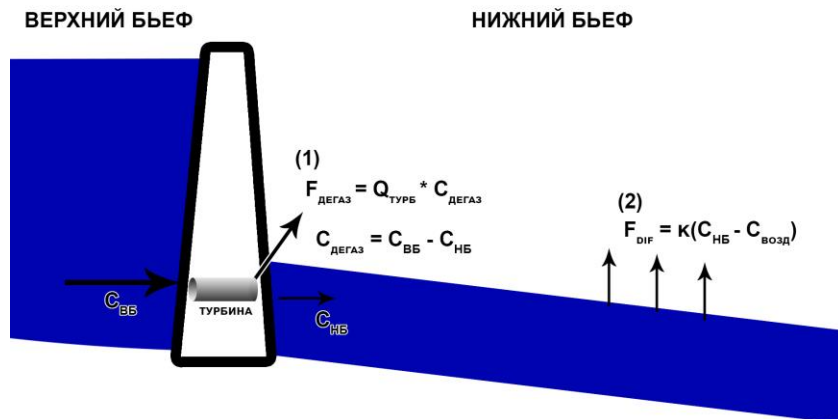
Саяно-Шушенское

Чиркейское



# Полевые исследования

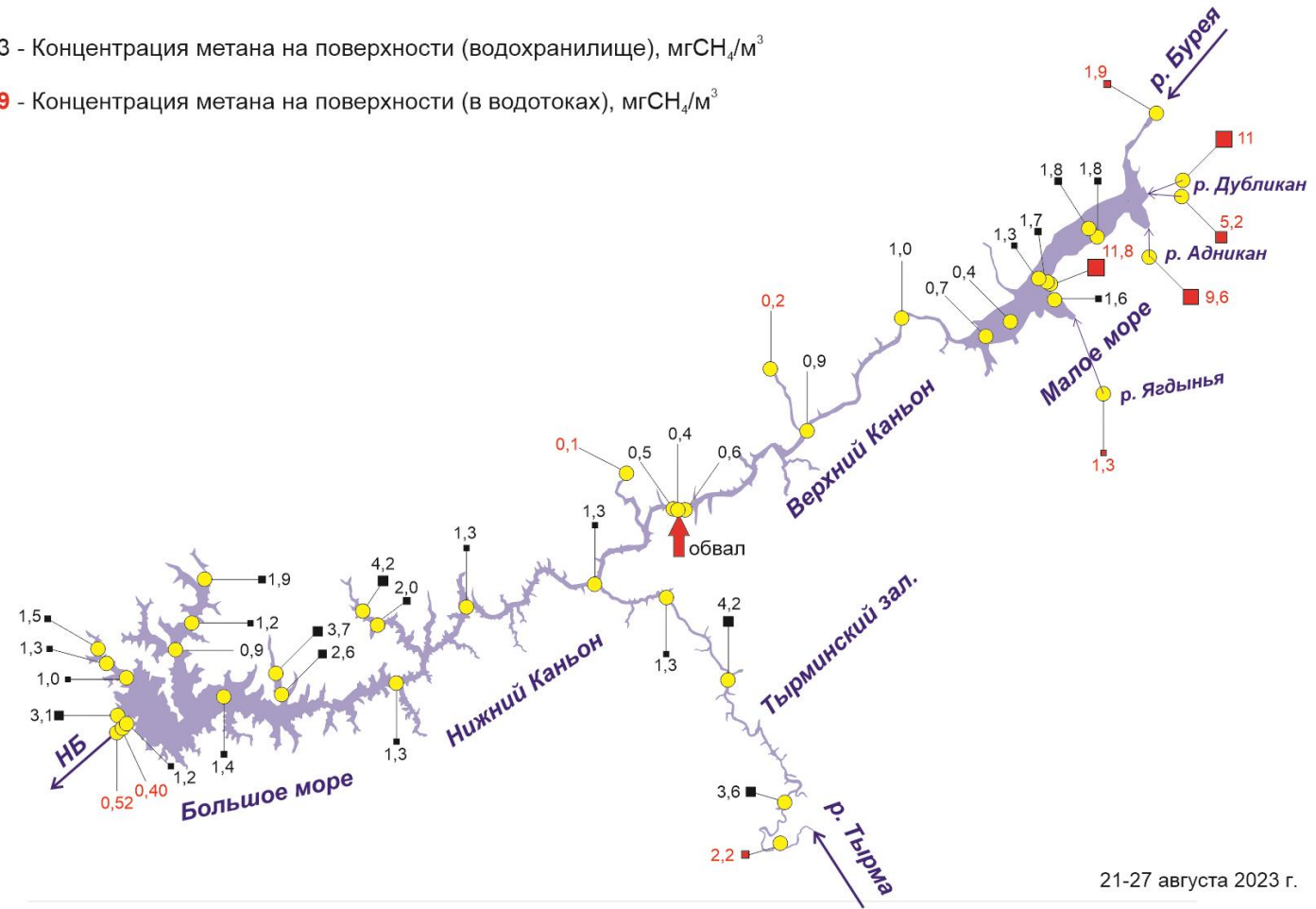
- ❖ Измерения удельного потока метана – метод «плавучих камер»
- ❖ Измерения концентрации метана в воде – метод парофазной дегазации (Headspace)
- ❖ Сопутствующие измерения – зондирование водной толщи для определения профиля температуры и кислорода, гидрохимические исследования



Пример схемы расположения станций измерений (Бурейское водохранилище)

1,3 - Концентрация метана на поверхности (водохранилище),  $\text{мгCH}_4/\text{м}^3$

1,9 - Концентрация метана на поверхности (в водотоках),  $\text{мгCH}_4/\text{м}^3$



21-27 августа 2023 г.

# Описание модели LAKE 3.2

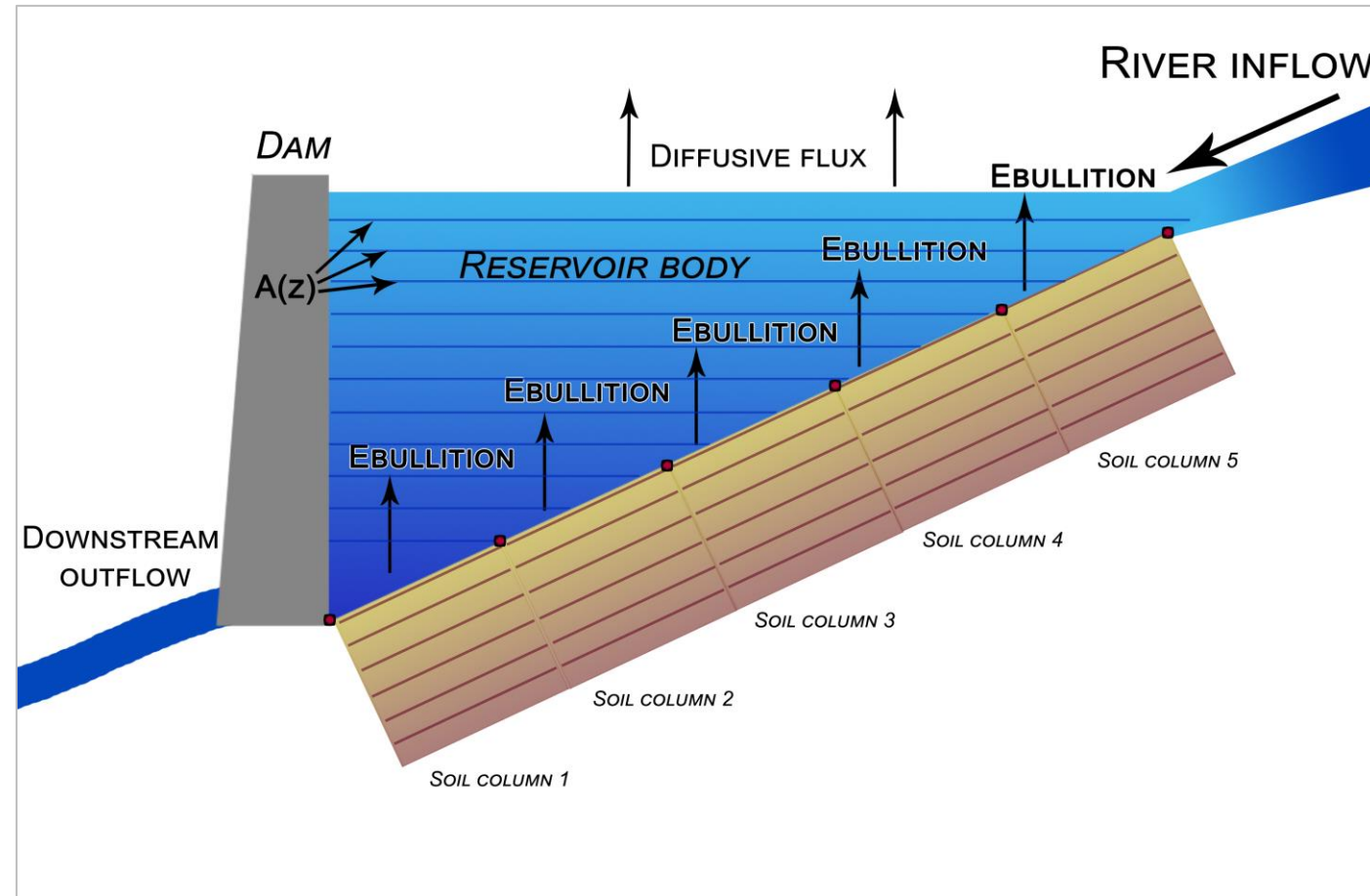
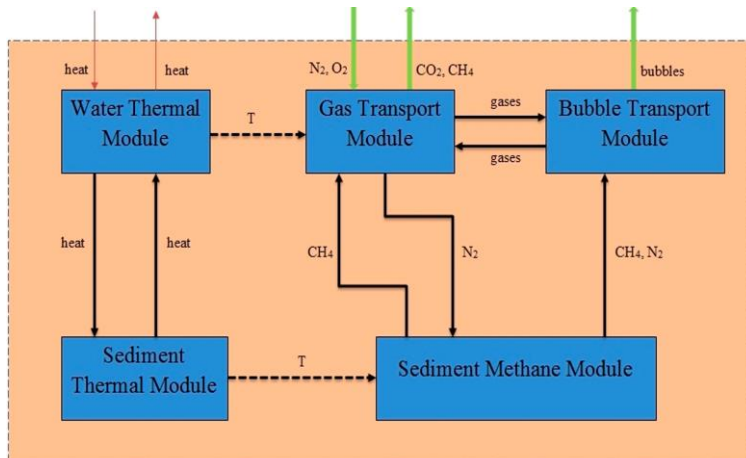
$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = -\frac{1}{A} \oint_{\Gamma_A} f \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{w} \bar{f}}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[ A (k_T + k_m) \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \right] - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{\Phi}_f}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left( F_{f, \Gamma_{A(z)}} + \Phi_{f, \Gamma_{A(z)}} \right) + \bar{R}$$

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

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



# Постановка численных экспериментов

---

## Метеорологическая информация:

- ❖ Температура
- ❖ Давление
- ❖ Влажность
- ❖ Скорость ветра
- ❖ Нисходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации
- ❖ Осадки

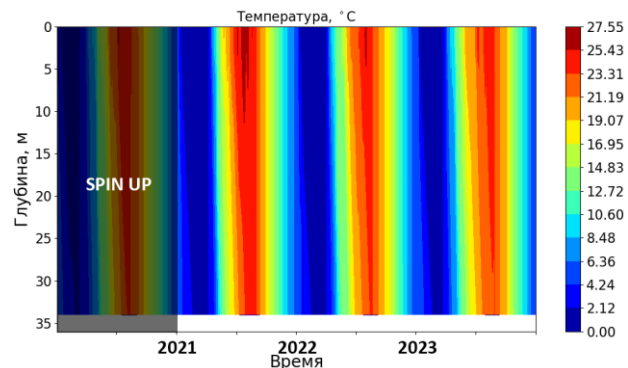
## Данные о водном балансе водохранилища:

- ❖ Расход притоков
- ❖ Температура притоков
- ❖ Содержание кислорода в притоках
- ❖ Уровень воды
- ❖ Сброс воды в НБ

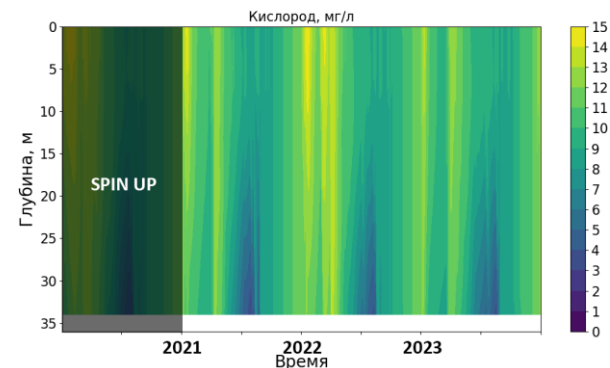
- ❖ Шаг модели – 1800 сек (машинное время расчета около 65 секунд).  
Ускорение модели по сравнению с прошлыми версиями за счет использования модели Хендерсон-Селлерс вместо k-eps
- ❖ Период расчета: **1.01.2020 – 31.12.2023** (spin-up 1.01.2020 – 31.12.2020),  
оценка эмиссии метана за 2021 - 2023 гг.

# Выходная информация модели

Температурный режим водоема

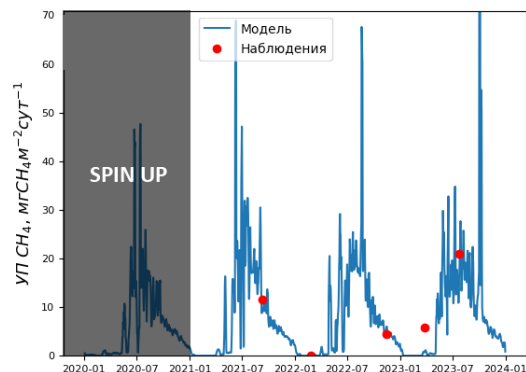


Кислородный режим водоема

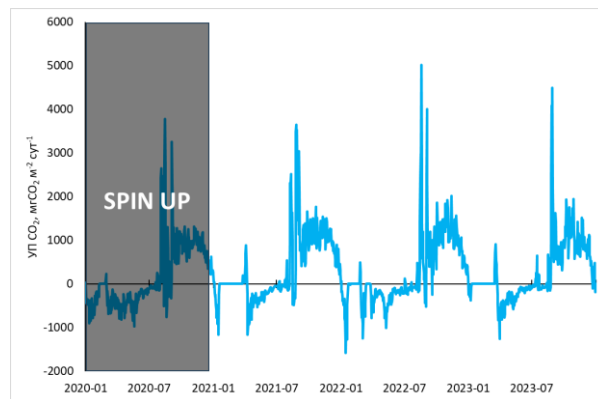


LAKE 3.2 model

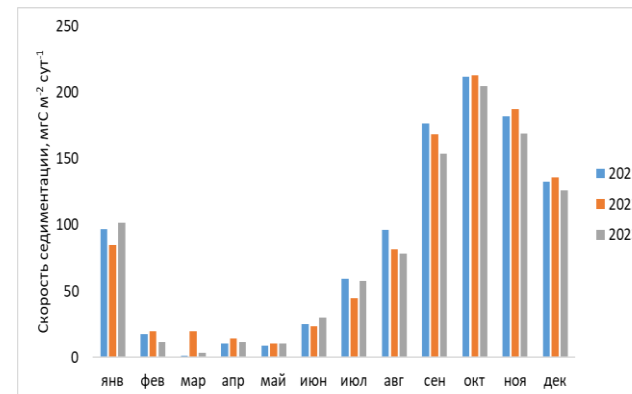
Потоки метана



Потоки CO<sub>2</sub>

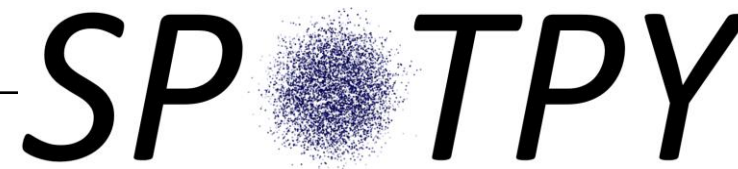


Скорость седиментации

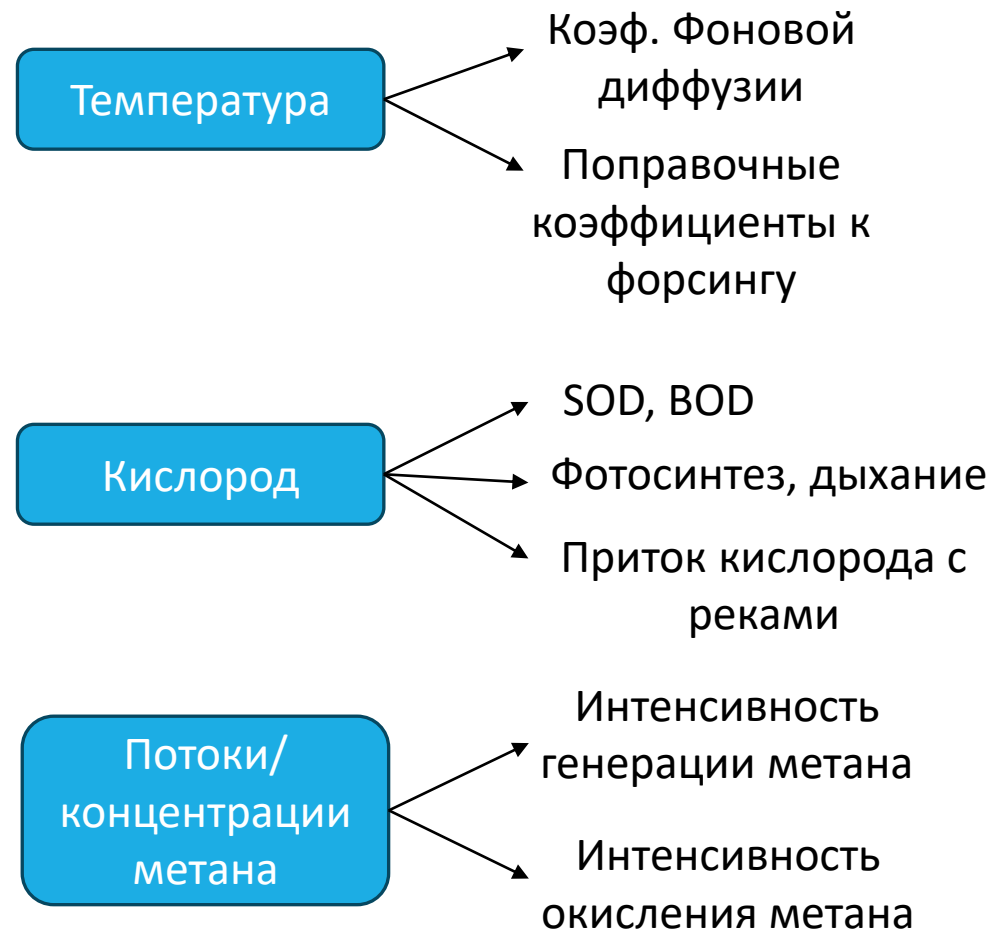


❖ А также содержание углерода, хлорофилла-а, органических веществ в воде и прочие характеристики

# Калибровка модели

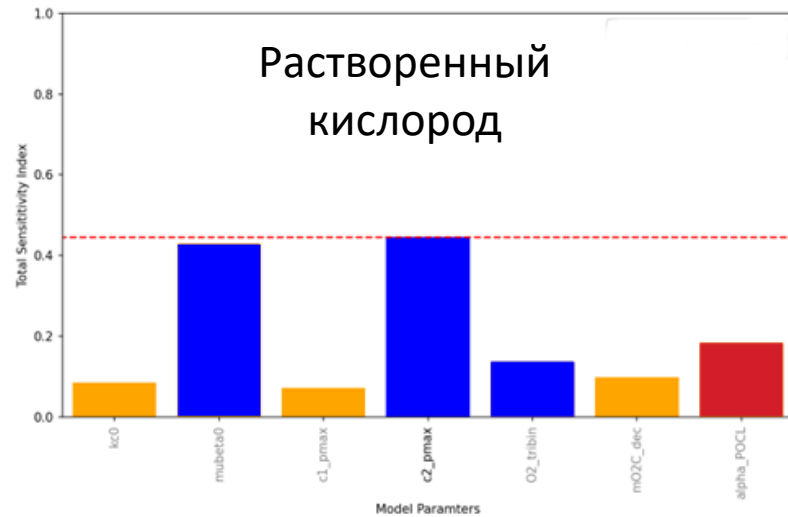


- ❖ Реализована с помощью пакета языка python “SPOTPY”
- ❖ Используются как методы случайного подбора параметров, так и эволюционные алгоритмы
- ❖ Процесс калибровки:
  - Температура
    - Содержание растворенного кислорода
    - Потоки метана в атмосферу
- ❖ Количество запусков: 20 ~ 1000, в зависимости от хода калибровки



# Оценка чувствительности модели

## ❖ FAST – Fourie Amplitude Sensitivity Testing



Наиболее чувствительные параметры для кислорода:

- ❖ C2\_pmax – зависимость скорости фотосинтеза от температуры
- ❖ Mubeta0 – базовая скорость потребления кислорода донными отложениями
- ❖ O2tribin – содержание кислорода в притоках



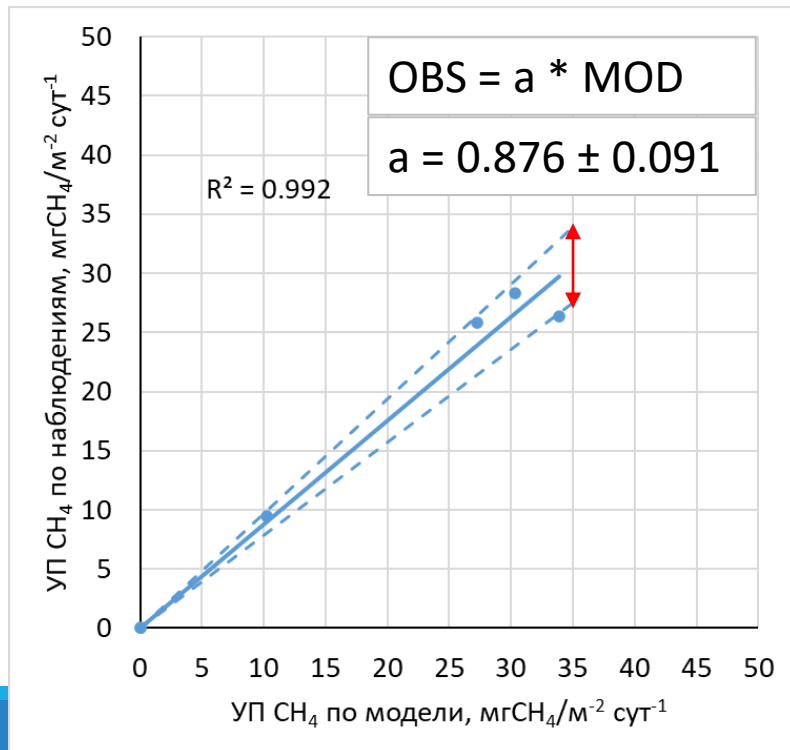
Наиболее чувствительные параметры для кислорода:

- ❖ R0 methane prod – базовая скорость генерации метана в донных отложениях
- ❖ Vmax – максимальная скорость окисления метана в воде
- ❖ q10 – параметр зависимости генерации метана от температуры

# Оценка доверительного интервала для результатов модели

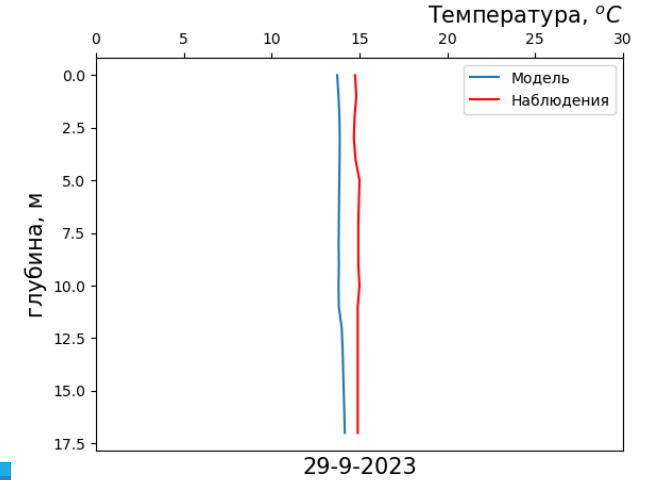
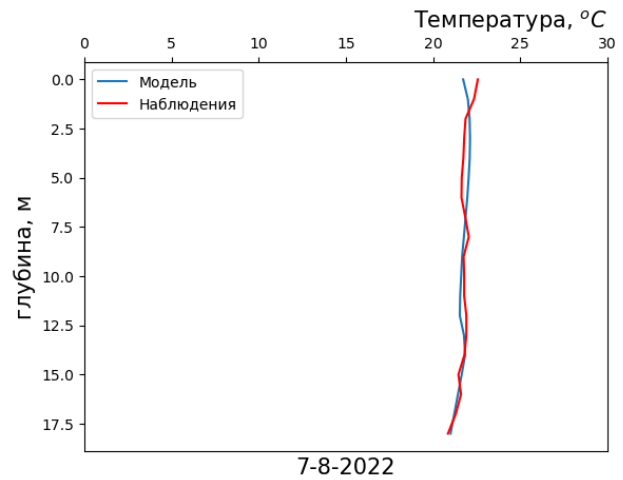
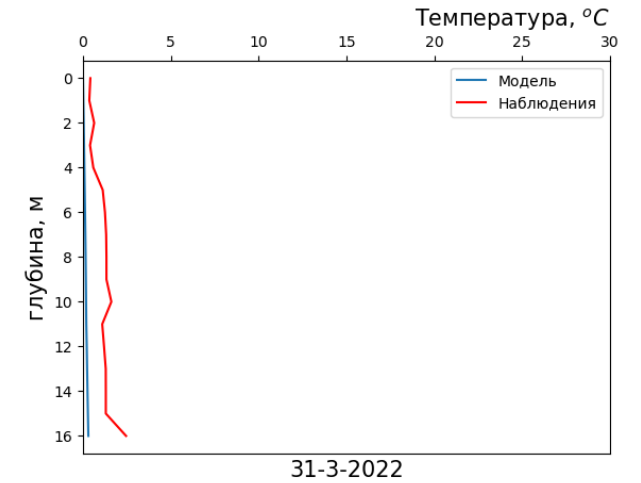
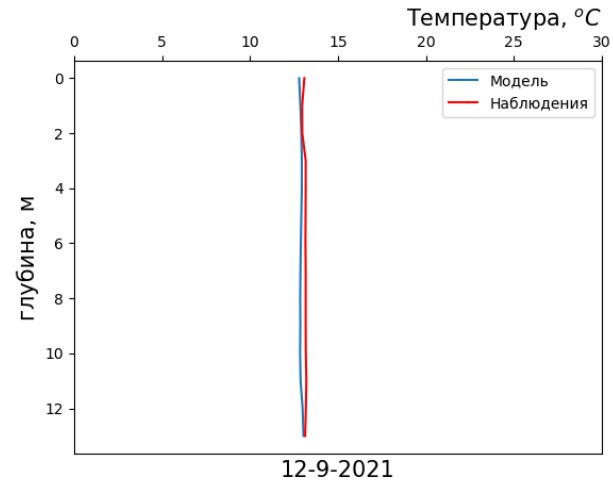
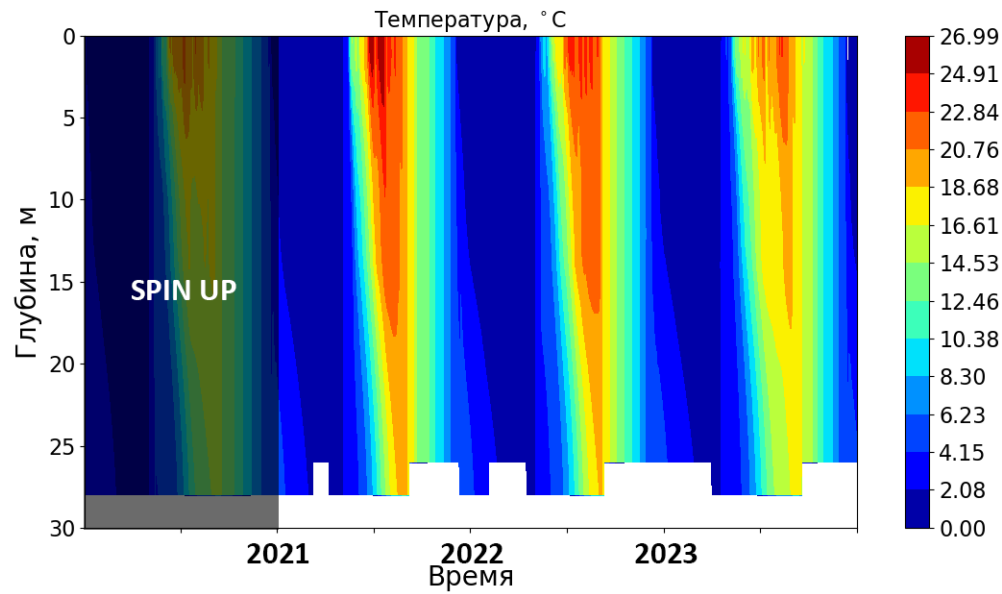
$$rMAE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MOD_i - OBS_i)}{\overline{OBS}} * 100\%$$

Пример графика для оценки доверительного интервала (Куйбышевское водохранилище)

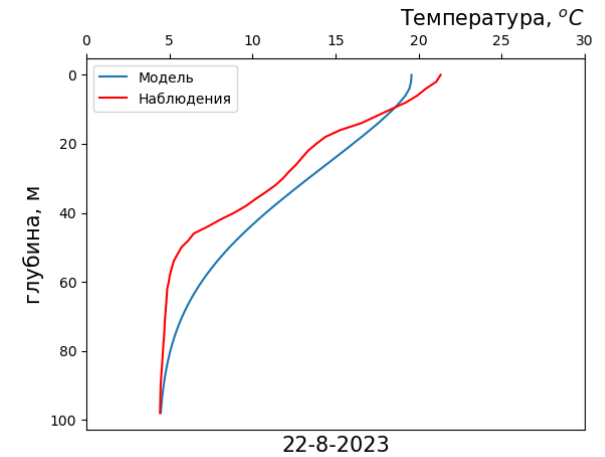
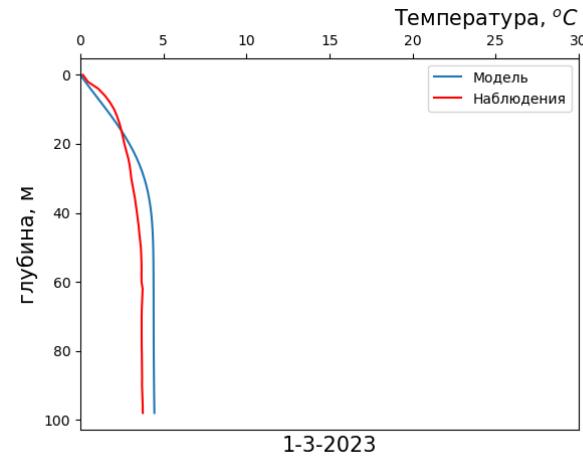
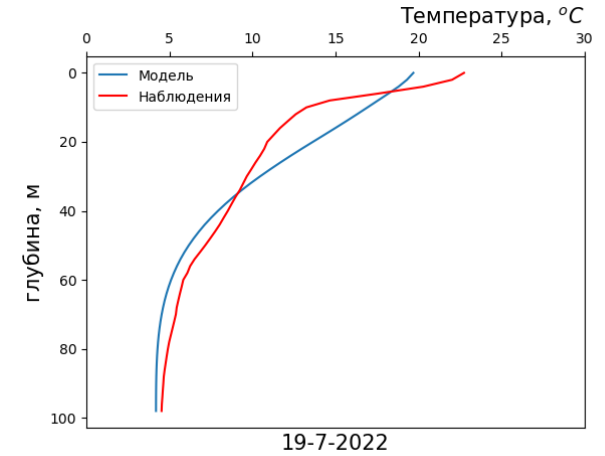
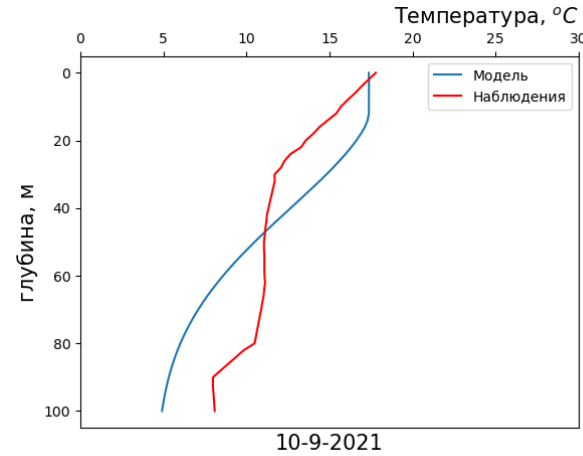
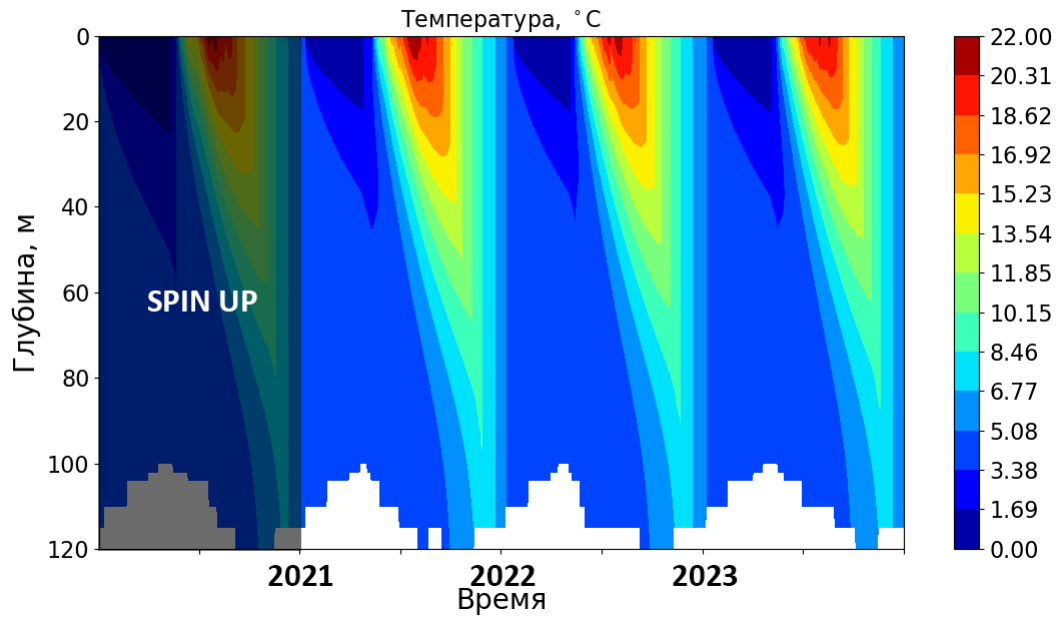


| Водохранилище   | Средний УП метана<br>НАБЛЮДЕНИЯ,<br>$мгCH_4 м^{-2} сут^{-1}$ | Средний УП метана<br>МОДЕЛЬ,<br>$мгCH_4 м^{-2} сут^{-1}$ | rMAE по УП метана |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|
| Рыбинское       | 66.9                                                         | 67.9                                                     | 1.44%             |
| Бурейское       | 4.82                                                         | 5.99                                                     | 24.2%             |
| Волгоградское   | 8.56                                                         | 7.06                                                     | -17.5%            |
| Куйбышевское    | 15.0                                                         | 17.0                                                     | 12.9%             |
| Чиркейское      | 4.04                                                         | 3.53                                                     | -12.7%            |
| Зейское         | 4.91                                                         | 5.25                                                     | 6.96%             |
| Колымское       | 1.47                                                         | 1.51                                                     | 3.07%             |
| Богучанское     | 1.42                                                         | 2.16                                                     | 52.1%             |
| Саяно-Шушенское | 3.67                                                         | 2.84                                                     | -22.6%            |

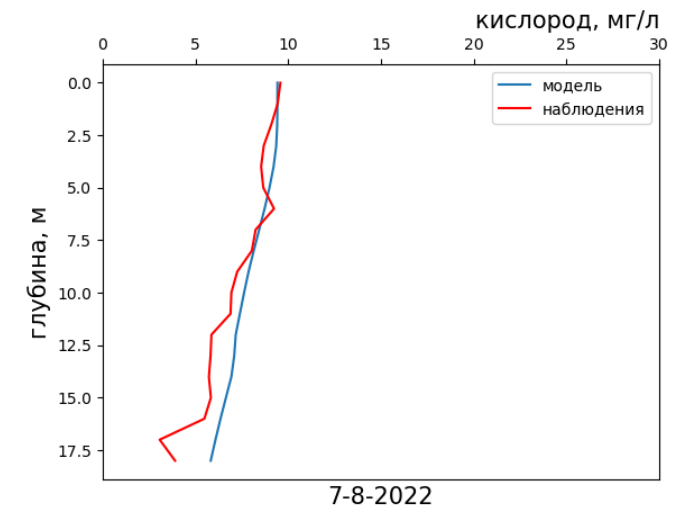
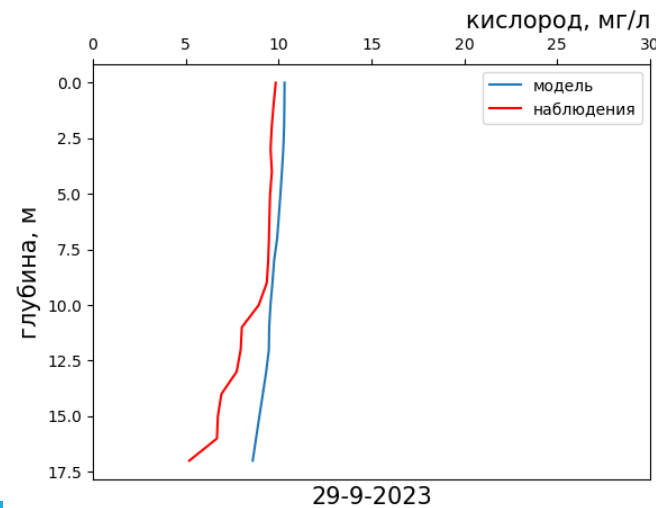
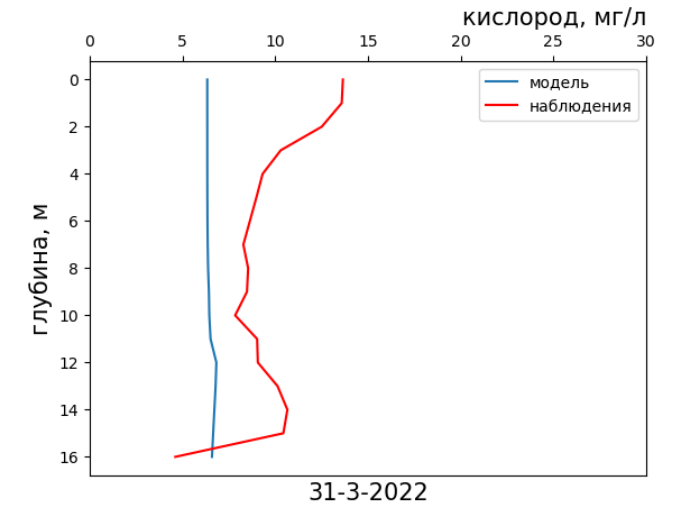
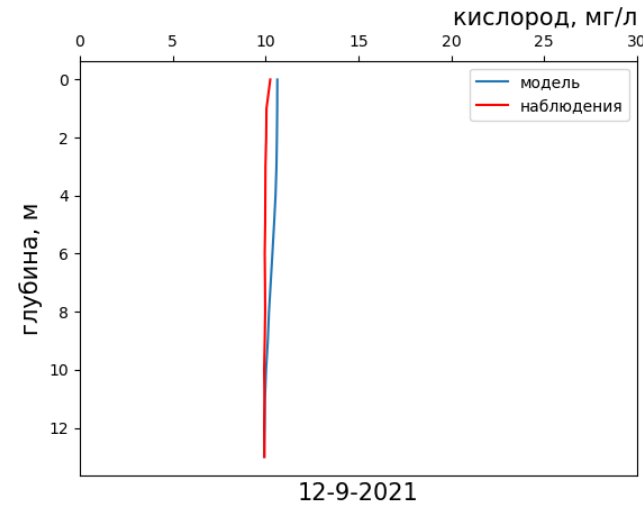
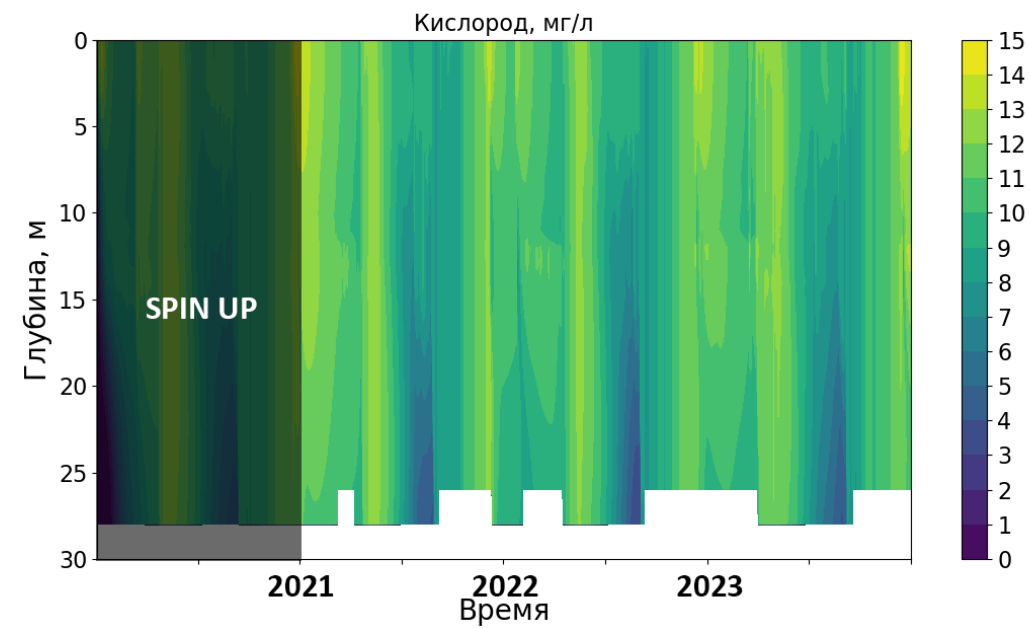
# Воспроизведение температурного режима (Рыбинское водохранилище)



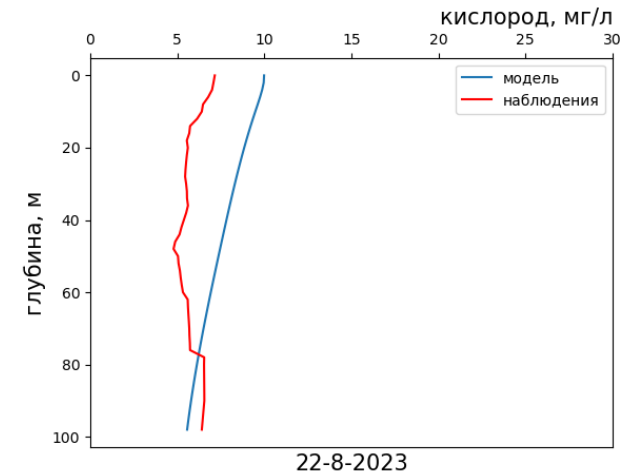
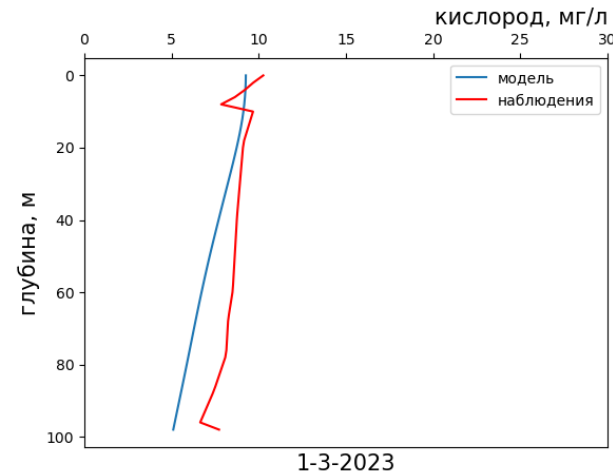
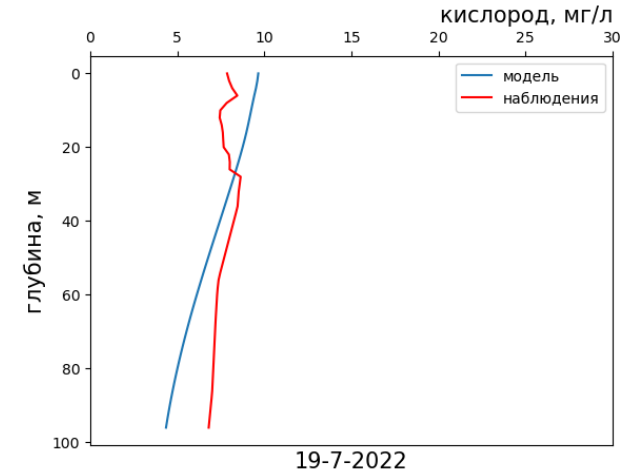
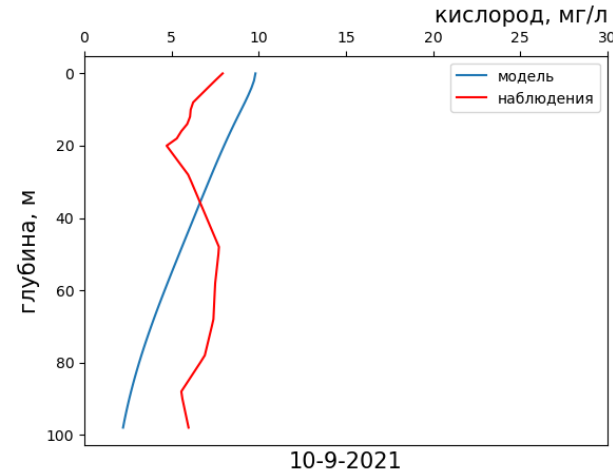
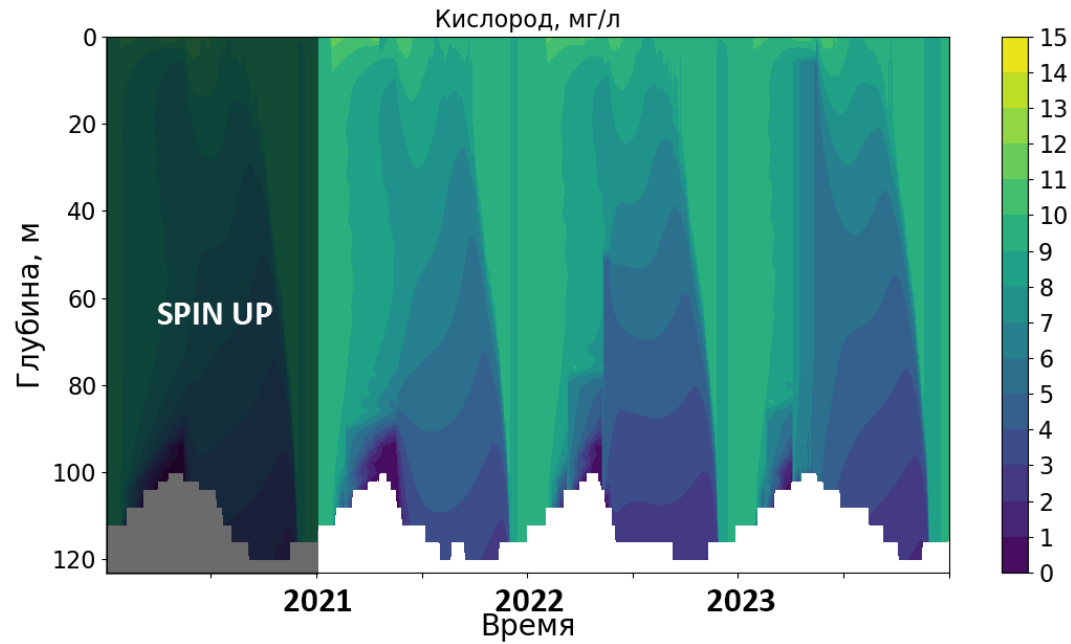
# Воспроизведение температурного режима (Бурейское водохранилище)



# Воспроизведение кислородного режима (Рыбинское водохранилище)

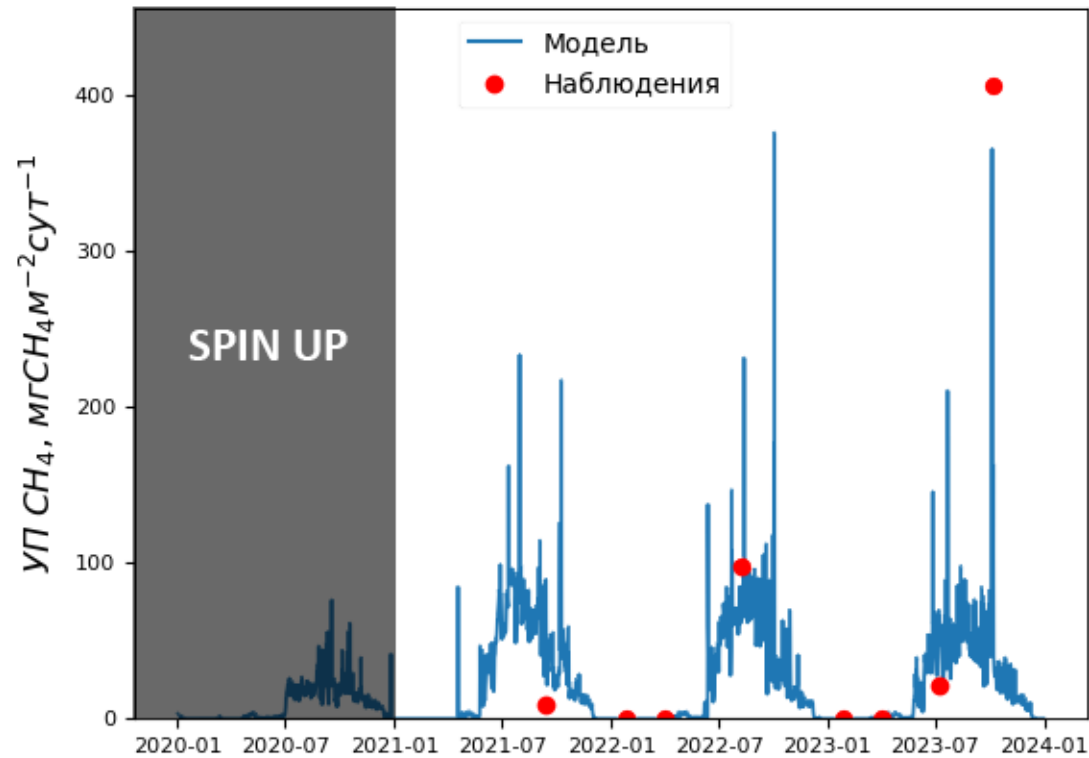


# Воспроизведение кислородного режима (Бурейское водохранилище)

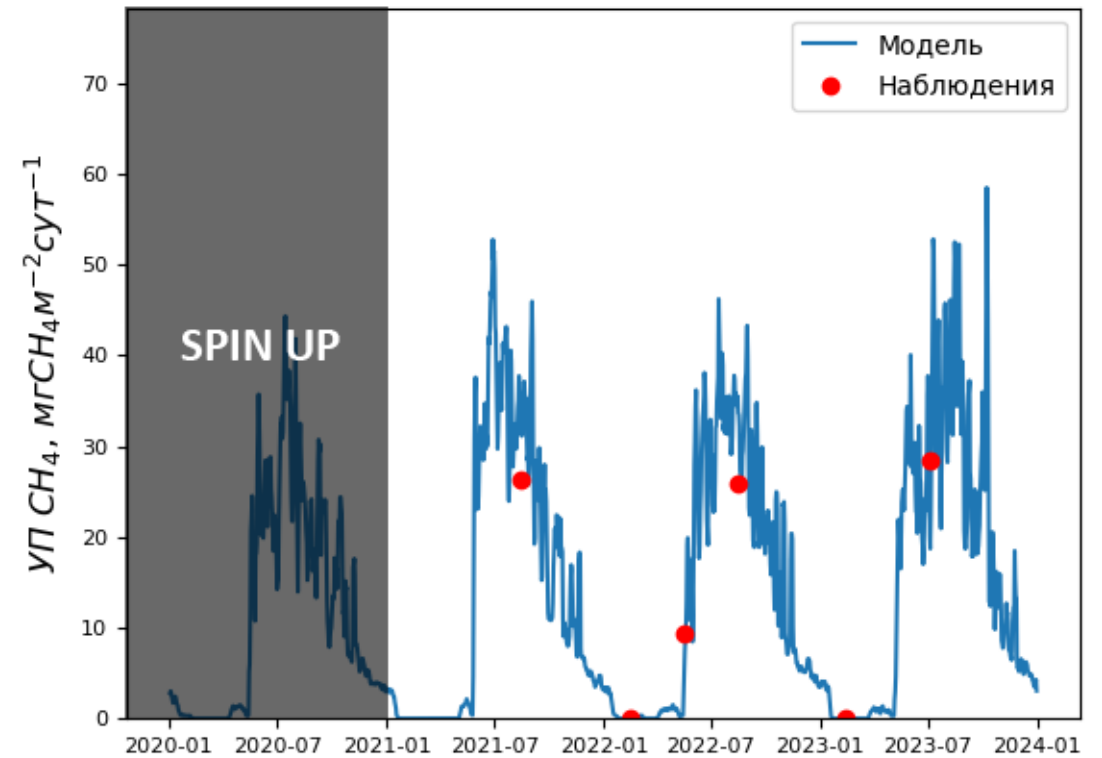


# Пример итогового результата моделирования годовой эмиссии метана из водохранилищ

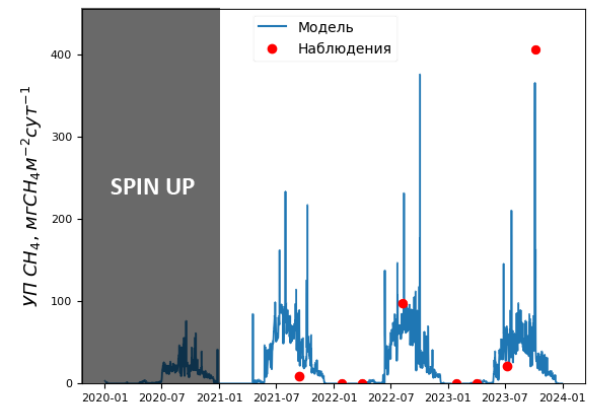
## Рыбинское



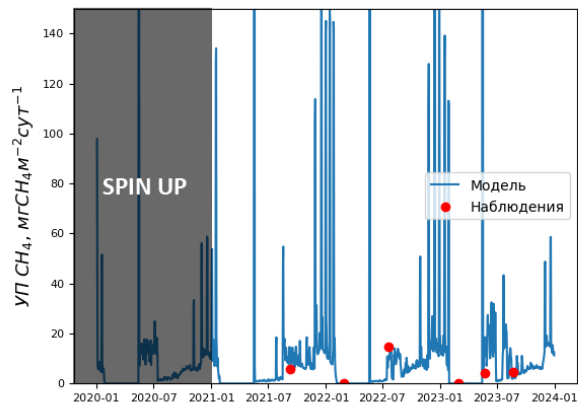
## Куйбышевское



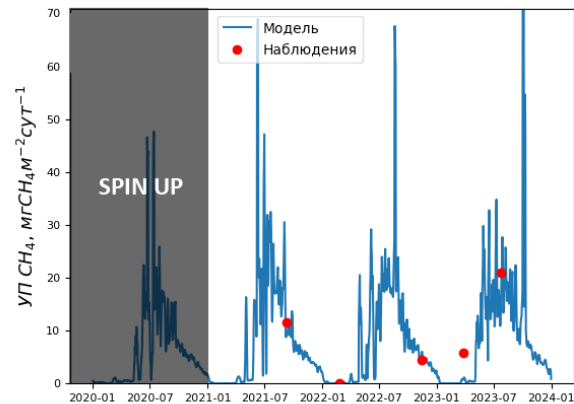
Рыбинское



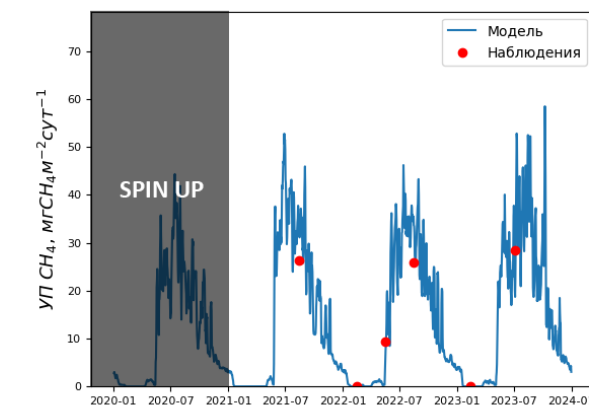
Бурейское



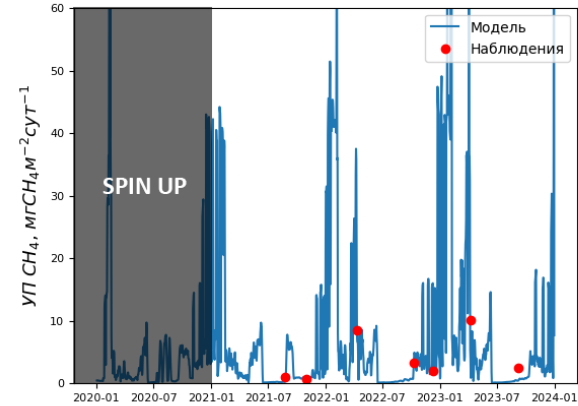
Волгоградское



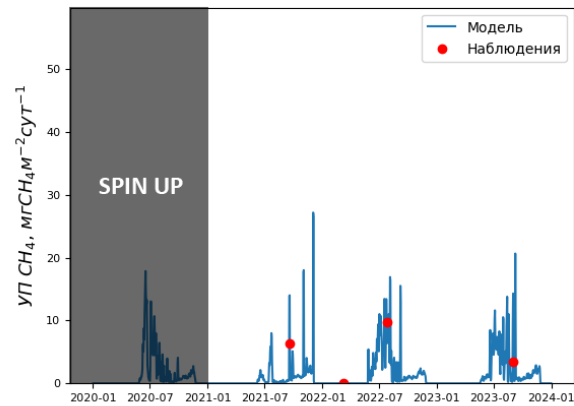
Куйбышевское



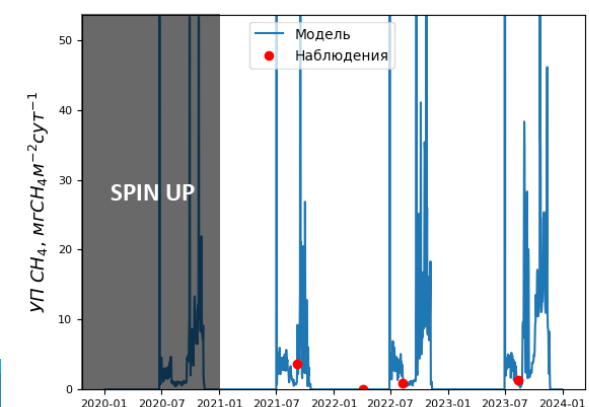
Чиркейское



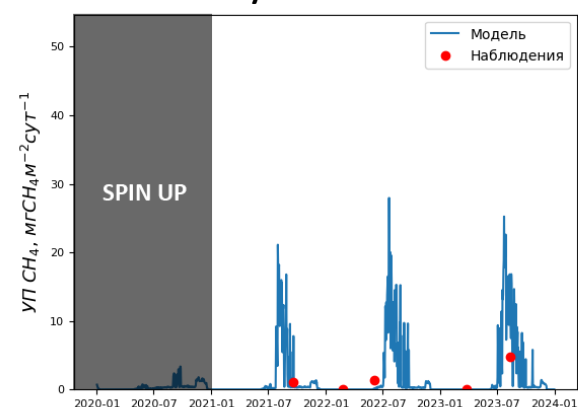
Зейское



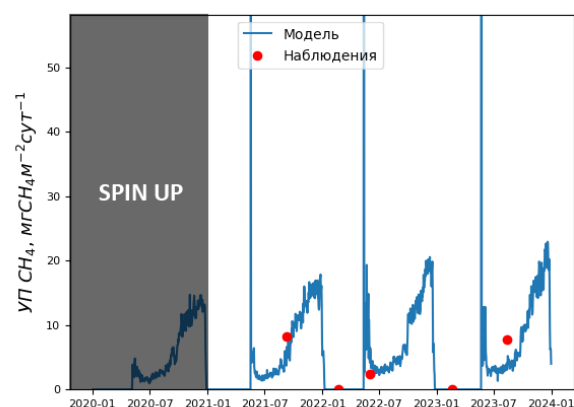
Колымское



Богучанское

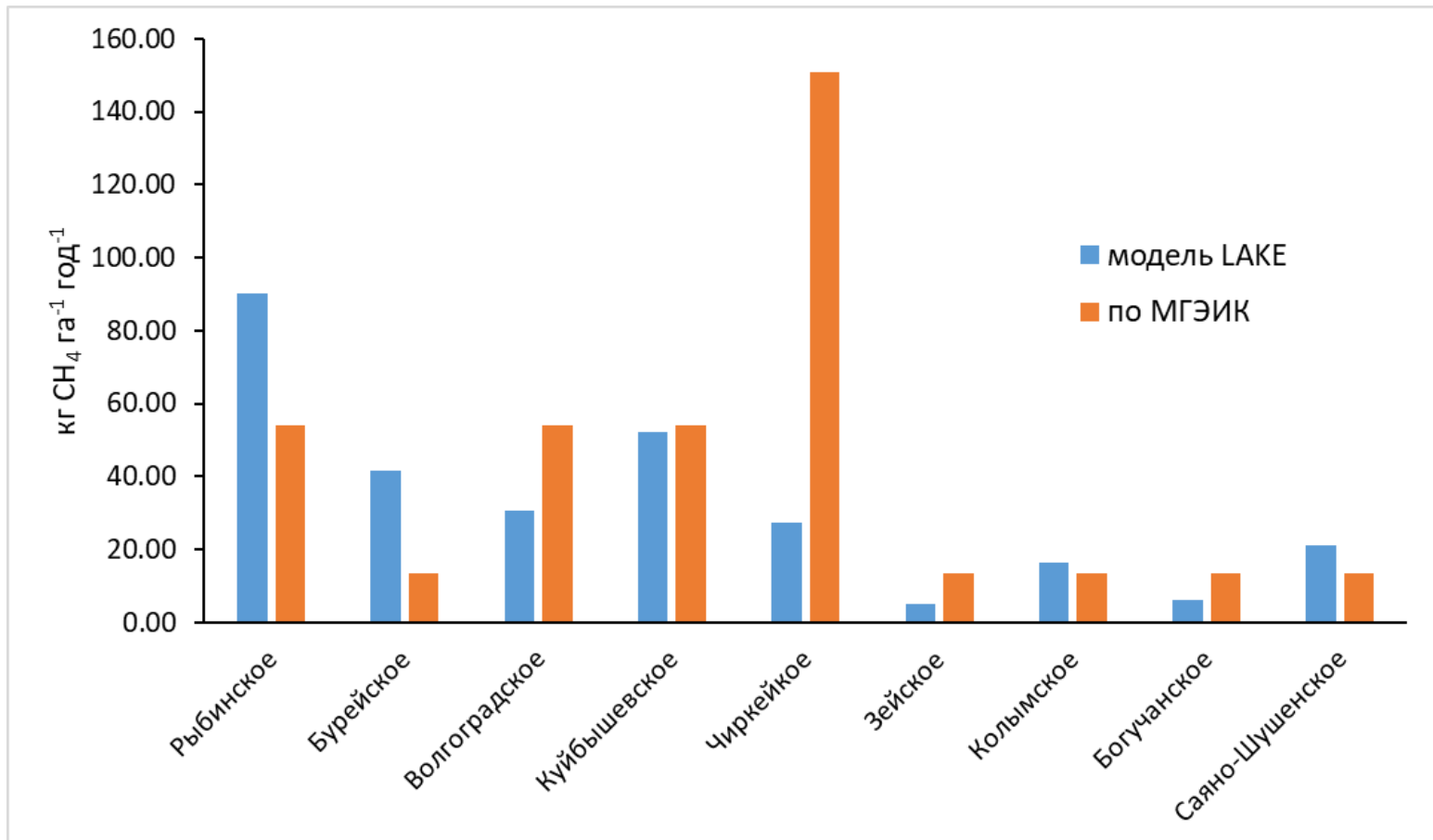


Саяно-Шушенское



| Водоем          | Эмиссия $\text{CH}_4$ , тыс. т в год |
|-----------------|--------------------------------------|
| Рыбинское       | $26.5 \pm 3.9$                       |
| Бурейское       | $1.85 \pm 1.42$                      |
| Волгоградское   | $6.28 \pm 1.91$                      |
| Куйбышевское    | $19.4 \pm 2.0$                       |
| Чиркейское      | $0.0690 \pm 0.0236$                  |
| Зейское         | $0.896 \pm 0.209$                    |
| Колымское       | $0.526 \pm 0.176$                    |
| Богучанское     | $1.15 \pm 0.39$                      |
| Саяно-Шушенское | $0.748 \pm 0.535$                    |

# Сравнение коэффициентов выбросов по модельным результатам и по рекомендованным значениям от МГЭИК



- ❖ Для большинства водохранилищ коэффициенты выбросов по результатам модели меньше, чем региональные значения по МГЭИК. Существенные завышения значений относительно региональных стандартов наблюдаются только для Рыбинского и Бурейского
- ❖ Наибольшее расхождение для Чиркейского водохранилища обусловлено тем, что по МГЭИК оно отнесено к влажной тропической зоне (условно, так как это горный регион)
- ❖ В заключительных этапах проекта будут учтены и другие составляющие углеродного баланса водохранилища для более точных оценок эмиссии и поглощения углерода

# Заключение

---

- ❖ На основании многочисленных полевых данных с помощью модели LAKE 3.2 была оценена величина эмиссии метана из разнотипных водохранилищ России
- ❖ Калибровка модели позволила выявить наиболее чувствительные параметры для воспроизведения температурного, кислородного режима и удельных потоков метана исследуемых водохранилищ
- ❖ Модель показала очень хорошую сходимость с результатами натурных наблюдений. С помощью описанного подхода была учтена значительная временная неоднородность потоков метана из водохранилищ, в том числе были оценены потоки метана в периоды невозможности проведения полевых измерений
- ❖ По результатам оценок для большинства водохранилищ наблюдается завышение коэффициентов выбросов, присвоенных МГЭИК для водохранилищ разных природных зон

---

Спасибо за внимание!