

# Исследование взаимодействия атмосферы с поверхностью равнинных водохранилищ: газо- и энергообмен и связь с климатической изменчивостью в регионе

И.А. Репина, А.Ю. Артамонов,  
М.И. Варенцов, М.Г. Гречушникова,  
И.А. Капустин, А.А. Мольков,  
В.М. Степаненко



Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
Московский государственный университет  
Институт прикладной физики РАН





Всероссийская общественная организация  
**РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО**  
Основано в 1845 году



# Проект РФФИ-РГО

Рук. И.А. Репина

(2017-2019)

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
Институт прикладной физики РАН  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии

## **Экспериментальное исследование взаимодействия атмосферы и равнинных водохранилищ Европейской территории России**

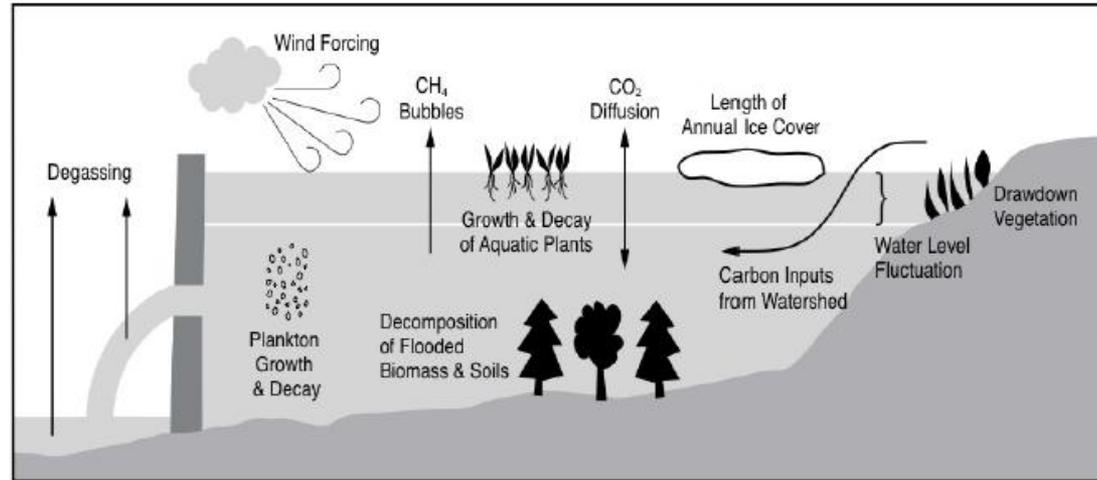
## Влияние водохранилищ на климат:

1. Изменение ветрового режима
2. Формирование конвективных пограничных слоев в осенний и зимний период
3. Изменение увлажненности региона

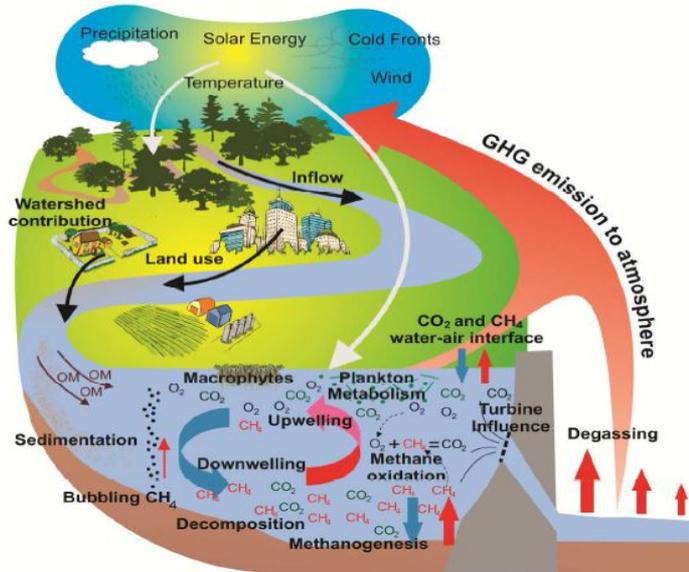


MODIS-terra,  
17 августа 2017

# Эмиссия парниковых газов из водохранилищ



- Затопленные экосистемы подвергаются длительному разложению в преимущественно анаэробных условиях
- В отличие от естественных водоемов, имеется дополнительный путь для эмиссии метана в атмосферу – через турбины



Mendonça et al, 2012

ОБЪЕКТ  
исследований

## Горьковское водхр.

Условно делится на три  
участка: речной,  
переходный и озерный

Год заполнения: 1955-

1957 Объем: 12,9 тыс. м<sup>3</sup>

Площадь: 1 591 км<sup>2</sup>

Длина: 430 км

Ширина: 16 км

Сред. глубина: 3.65м

Макс. Глубина: 29м

г.Рыбинск

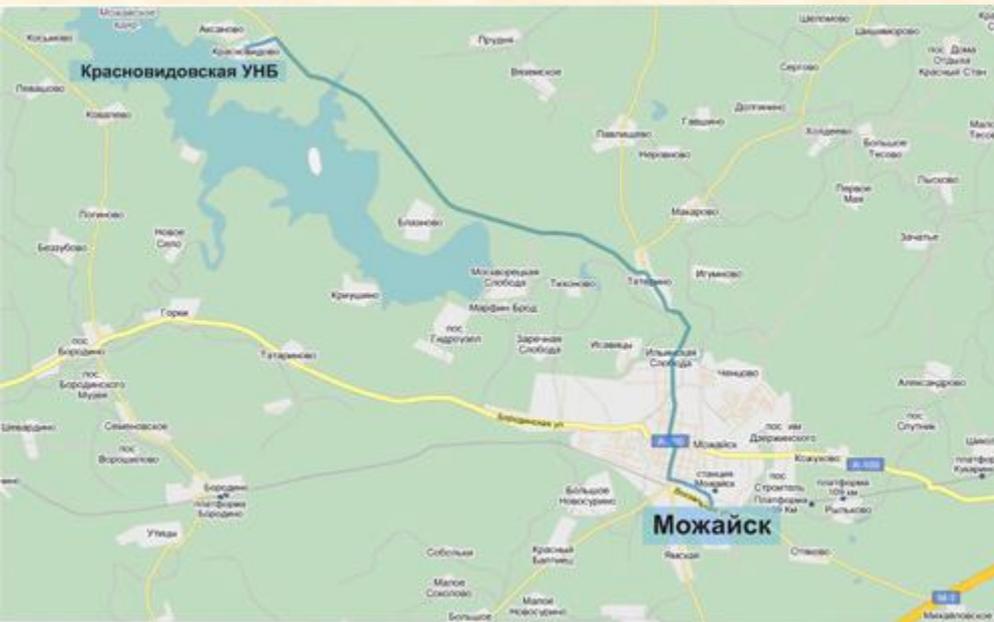
### Особенности водоема:

- 1) вытянутость с севера на юг;
- 2) различная ветро-волновая обстановка;
- 3) мощная антропогенная нагрузка;
- 4) сильное цветение водорослей;
- 5) пространственные масштабы, позволяющие проводить регулярные измерения;
- 6) **виден из космоса.**



г.Н.Новгород

# Можайское водохранилище



$$K_B < 2$$

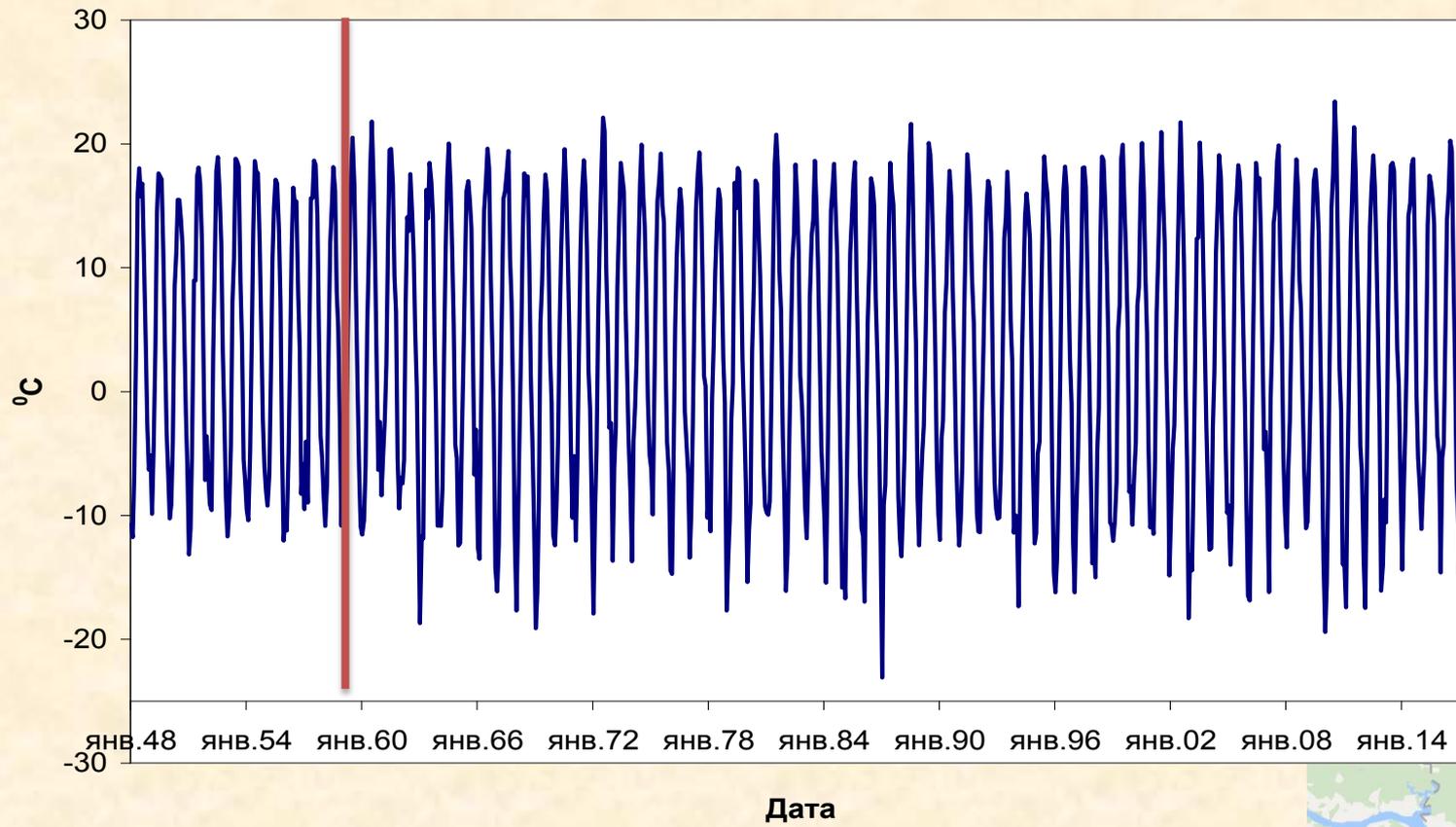
$$F = 30,7 \text{ км}^2, W = 235 \text{ млн м}^3$$

$$H_{\text{max}} = 23 \text{ м}$$

относительно глубоководно

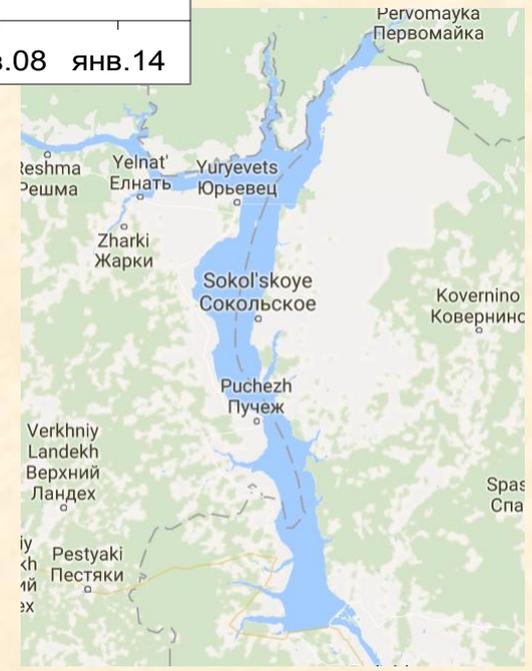
$$H_{\text{ср}} / V_{\text{ср}} = 7^0 / 00$$

Отсутствие сбросов и загрязнений

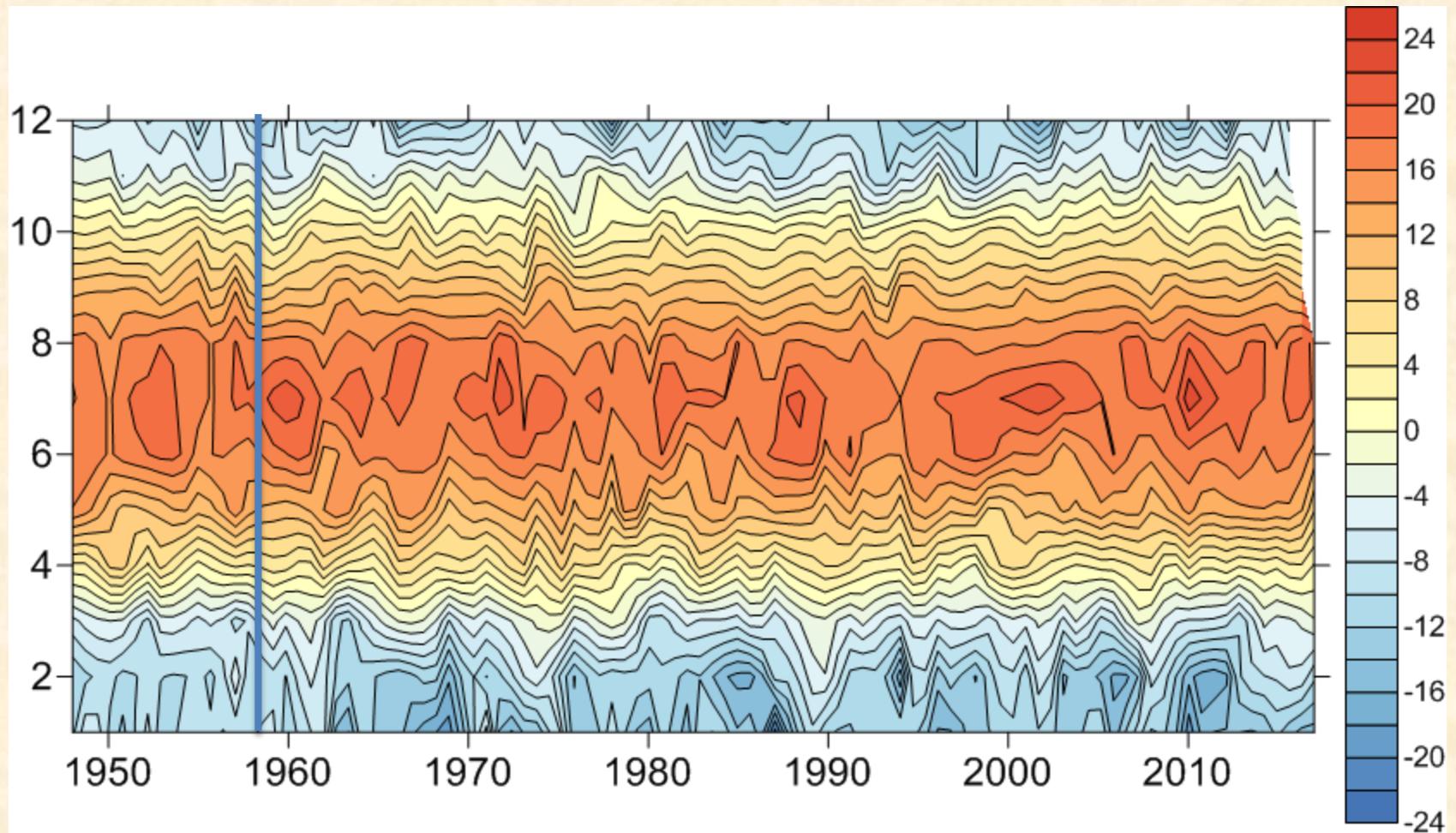


Дата

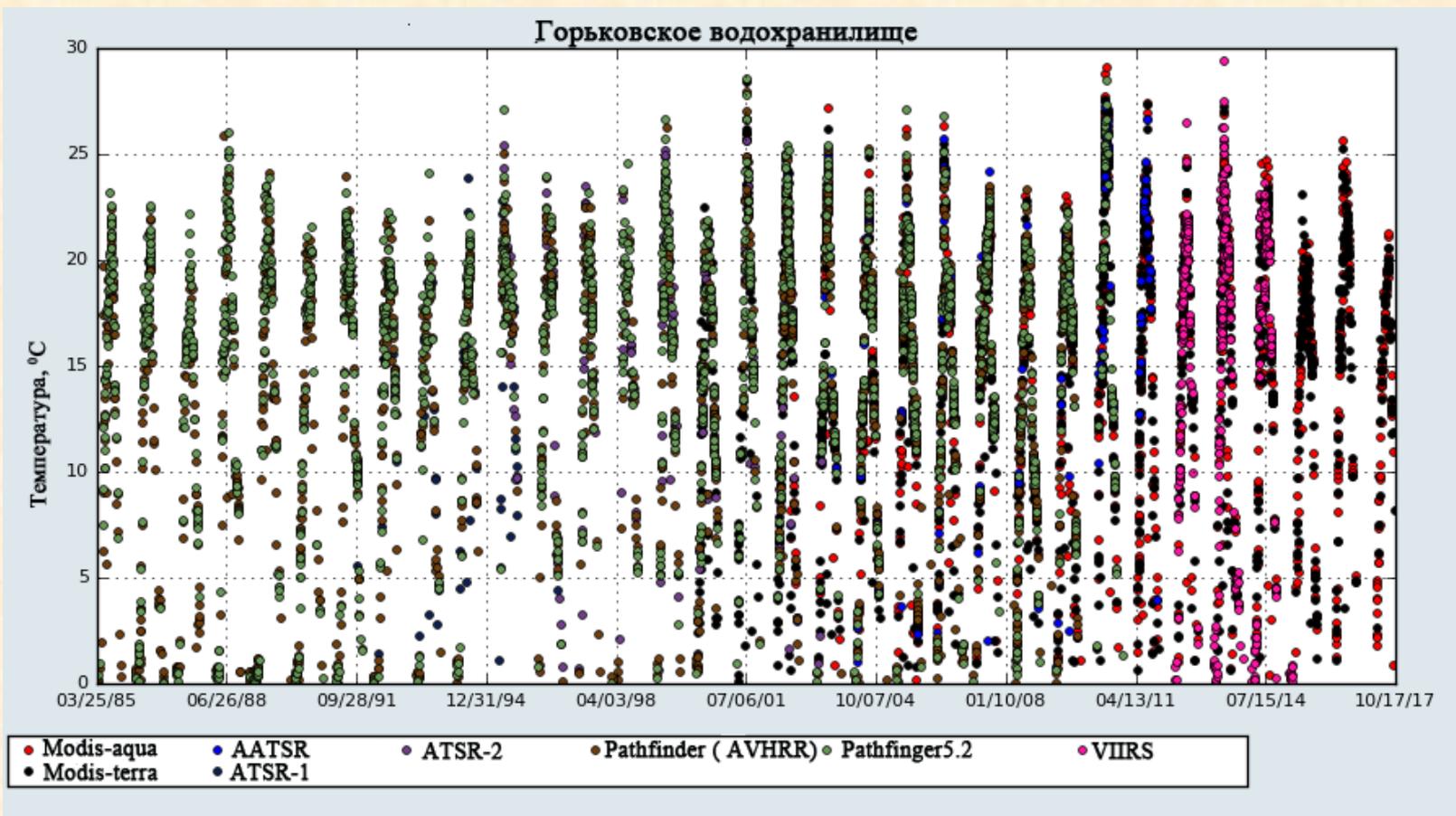
Изменение приземной температуры воздуха по данным реанализа GLDAS+MERRA (0.25 град)



## Сезонное изменение температуры в районе Горьковского водохранилища



# Средняя температура поверхности по спутниковым данным

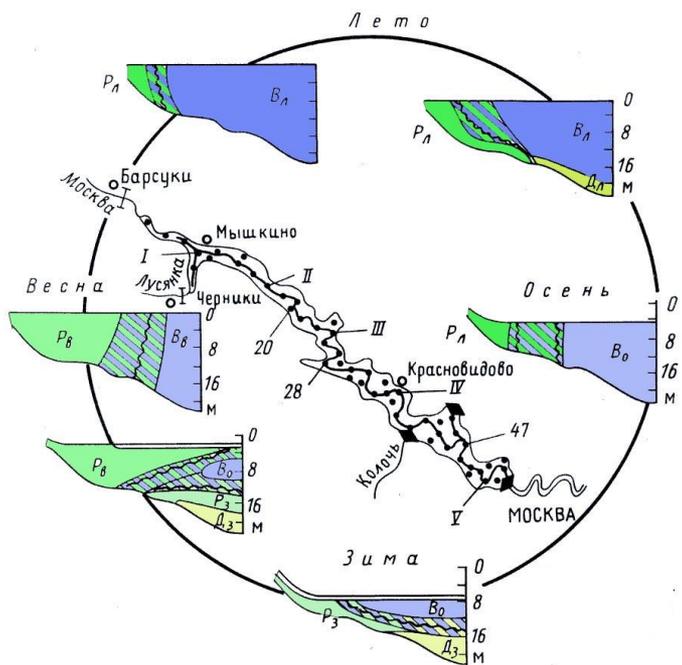


Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR) – ENVISAT

ATSR - ESA

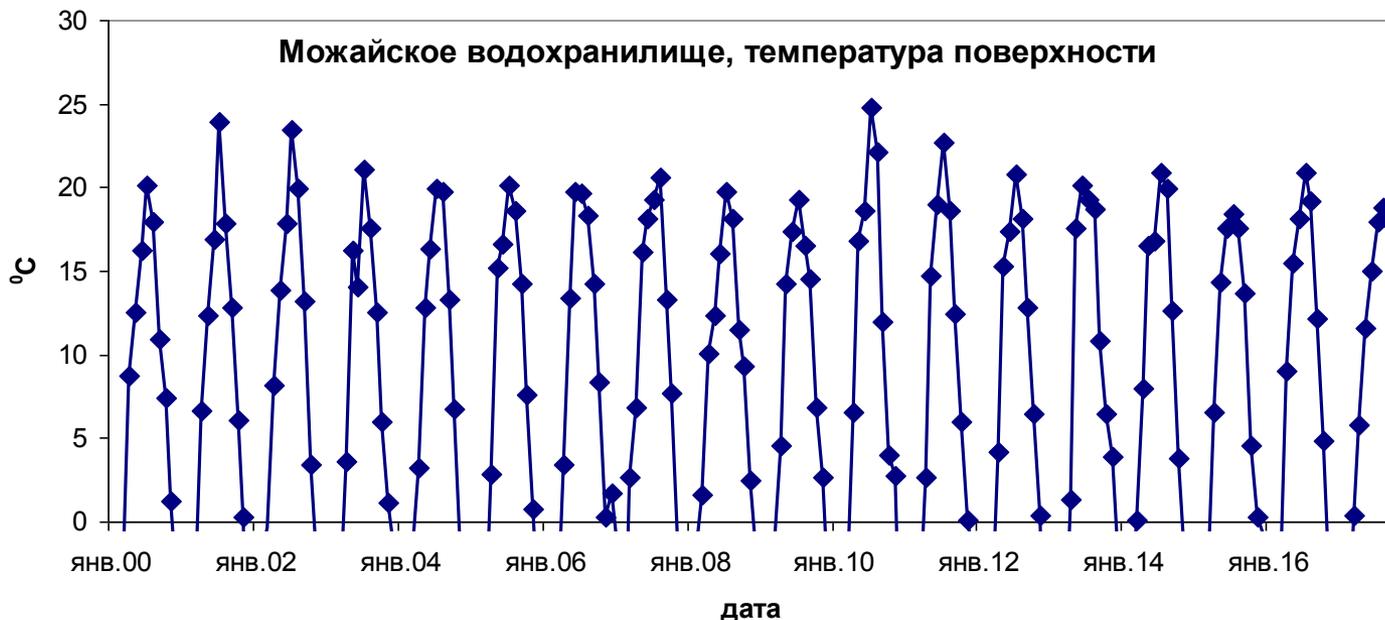
Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)



### Внутригодовое изменение гидрологической структуры водохранилища (на примере Можайского):

- Рв – речная весенняя ВМ,
  - Рл – речная летняя ВМ,
  - Рз – речная зимняя ВМ,
  - Вв – водохранилищная весенняя ВМ,
  - Вл – водохранилищная летняя ВМ,
  - Во – водохранилищная осенняя ВМ,
  - Дл – донная летняя ВМ,
  - Дз – донная зимняя ВМ
- (косой штриховкой показаны фронтальные зоны).



# Моделирование термического режима Можайского водохранилища

Одномерная модель водоёма LAKE (Stepanenko et al., 2016):

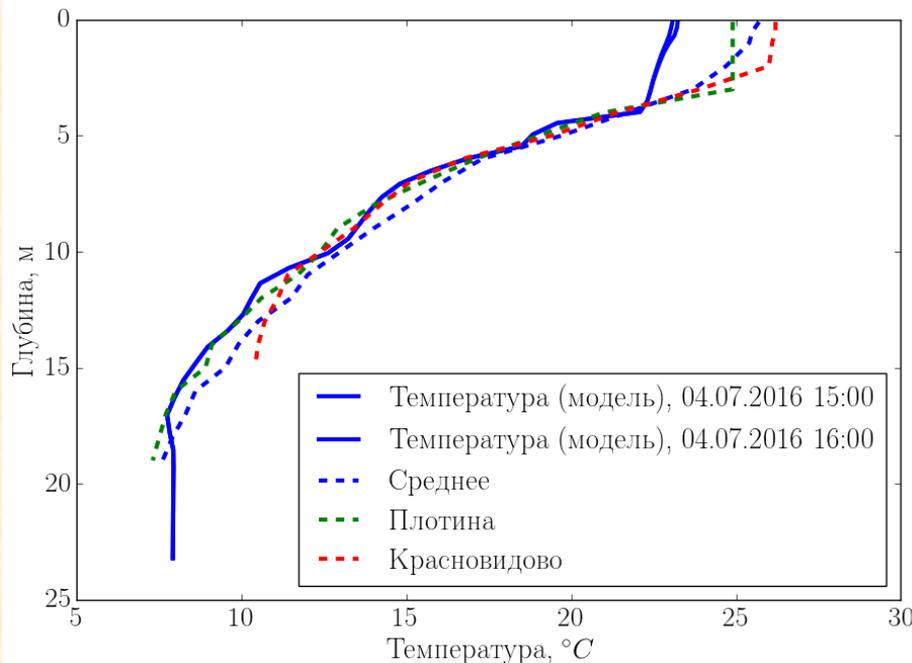
- Термо- и гидродинамика водоёма
- Биогеохимия водоёма и донных отложений  
( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ )

## Входные данные:

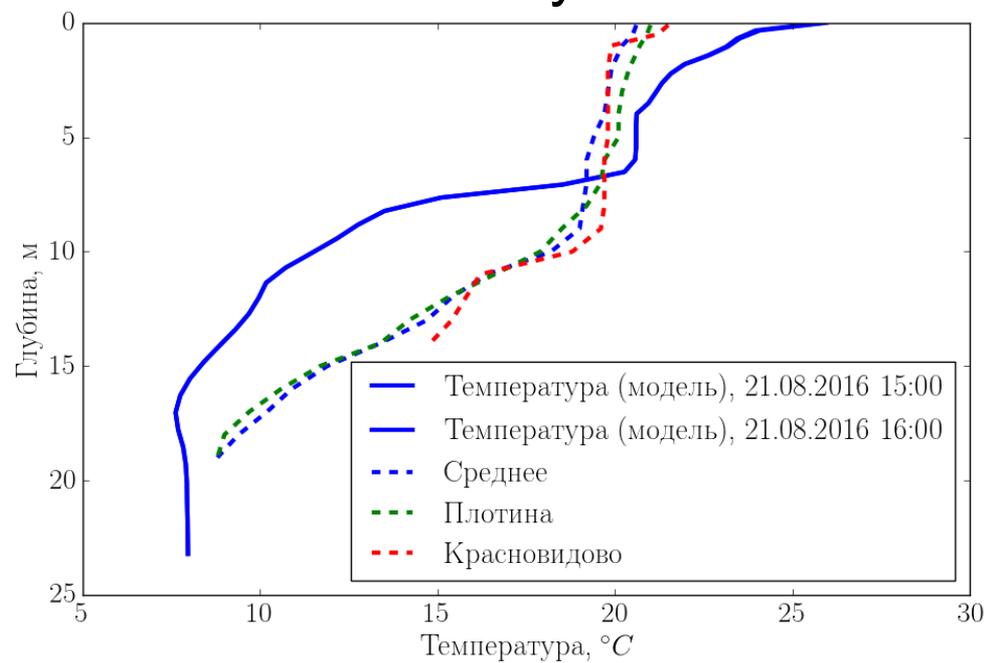
- Данные стандартных метеорологических измерений над водохранилищем
  - Нисходящие потоки радиации
- Характеристика формы дна (гипсометрическая кривая)
  - Расход и температура притоков

# Вертикальное распределение температуры, лето 2016 г.

Июнь



Август



В начале лета модель удовлетворительно воспроизводит профиль температуры, в конце лета – занижает интенсивность перемешивания. **Вывод:** стандартная к-ε модель не воспроизводит механизмы перемешивания, связанные с проточностью водохранилища.

# Трансформация веществ в воде водохранилища

## Процессы изменения концентрации

### Смешение

Формирование основной ВМ

Разбавление сточных вод

Распределение талой водой

### Концентрация

Испарение

Льдообразование

Биоконцентрирование ЗВ

### фото-и хемосинтез

Сорбция-десорбция

Абразия

Диффузия

Взмучивание

## Процессы изменения массы

### Обогащение

Газообмен с атмосферой

Выщелачивание ложа

Запыление

Азотификсация

Вынос из донных илов

### Обеднение

Окисление ОВ

Седиментация

Биоседиментация

Соосаждение

Денитрификация

Содержание метана (мкл/л)

09.06.2016

24.06.2016

13.07.2016

22.08.2016

в поверхностном  
и  
в придонном слое  
на ст. IV

2,4

3,1

3,0

3,3

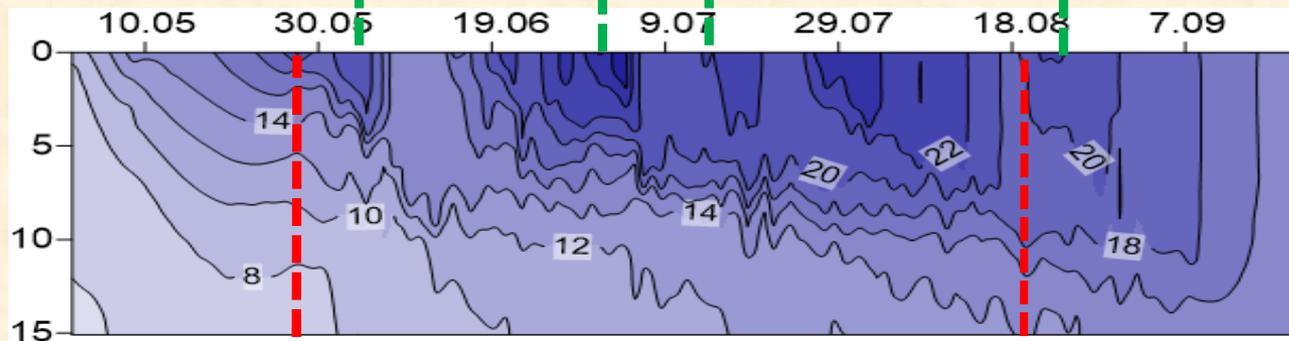
2,9

140

424

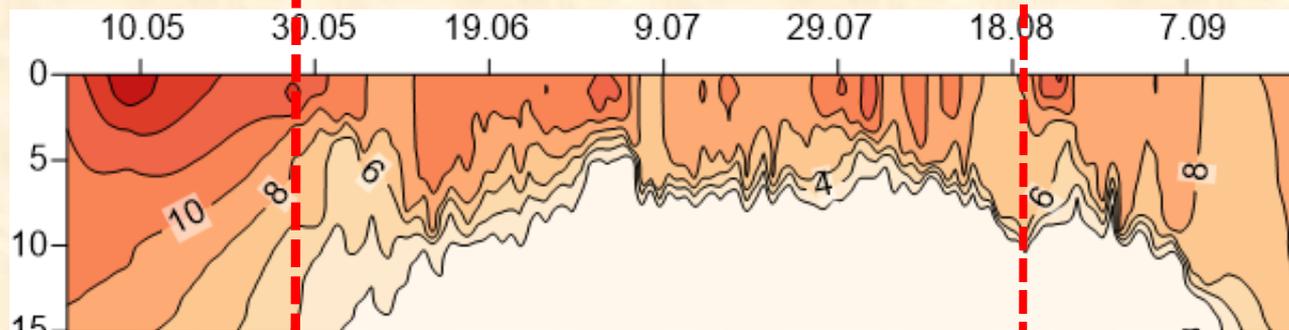
1846

Вертикальное  
распределение  
температуры воды  
по данным самописца



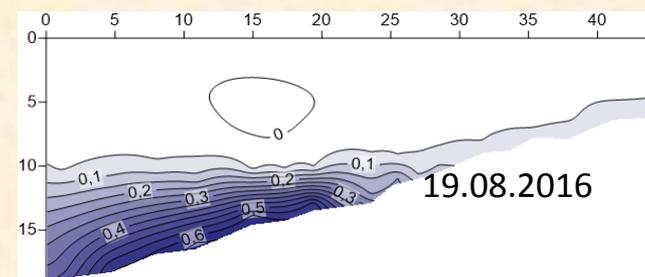
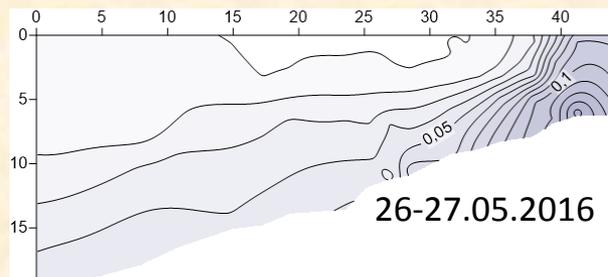
и растворенного кислорода  
по данным зондирования в  
2016 г.

на ст. IV



Пространственное  
распределение содержания

растворенного минерального  
фосфора по данным гидролого-  
гидрохимических синхронных  
съемок



Продолжительные бескислородные условия в малопроточном водохранилище способствуют увеличению содержания метана в летний период в придонных горизонтах на два порядка:

- в начале июня содержание метана в придонном слое 2-8 мкл/л,
- в начале июля – 100-950 мкл/л,
- в августе – 200-2500 мкл/л.

В поверхностном слое также выражены сезонные ее изменения, связанные с уменьшением устойчивости водной толщи при прогревании гипolimниона:

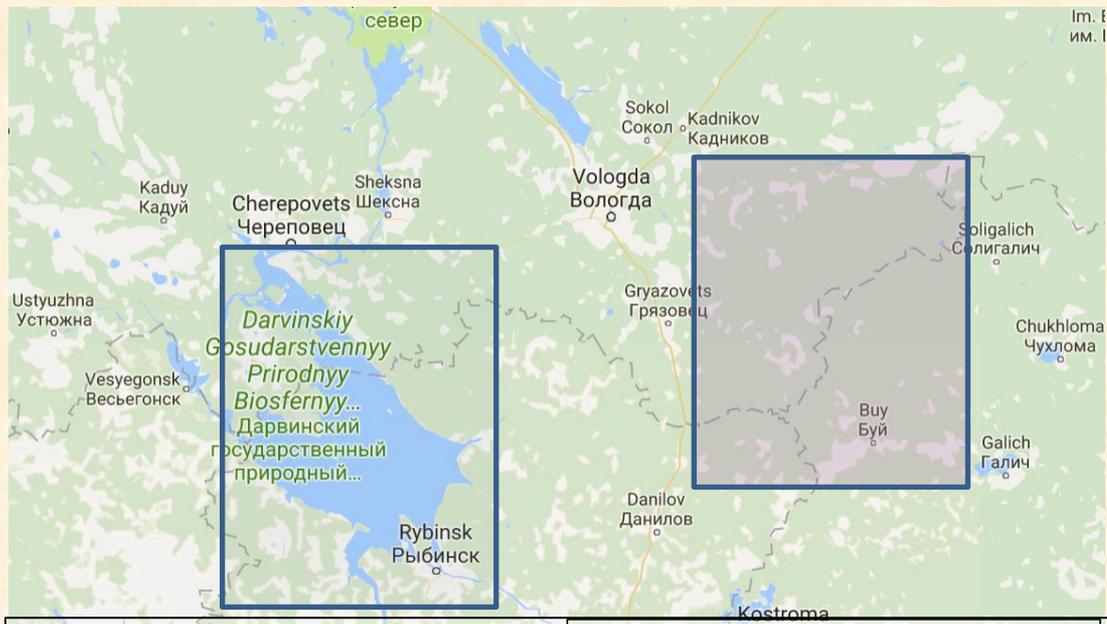
1-3 мкл/л в июне

2-10 мкл/л в начале июля

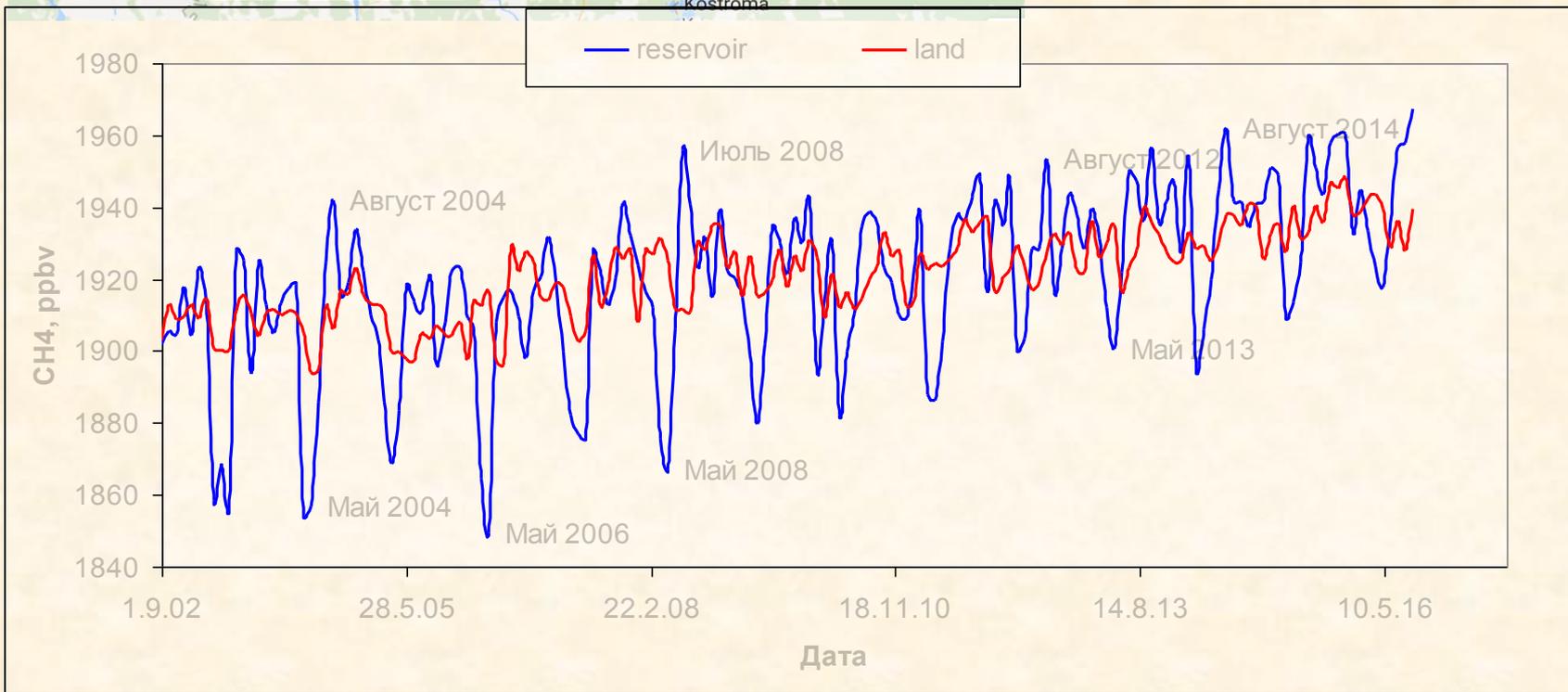
3-13 мкл/л в августе.

Наибольшие концентрации метана в поверхностном слое характерны для более мелководных верховьев водохранилища, что может быть связано как с более активным обменом с придонным слоем, так и с притоком речных вод.

Полученные в Можайском водохранилище значения на порядок превышают концентрацию метана в воде Горьковского водохранилища



Концентрация метана в слое 1-4 км по данным скаттерометра AIRS в районе Рыбинского водохранилища



# Работы на Горьковском водохранилище в 2017 г. (подспутниковый эксперимент)



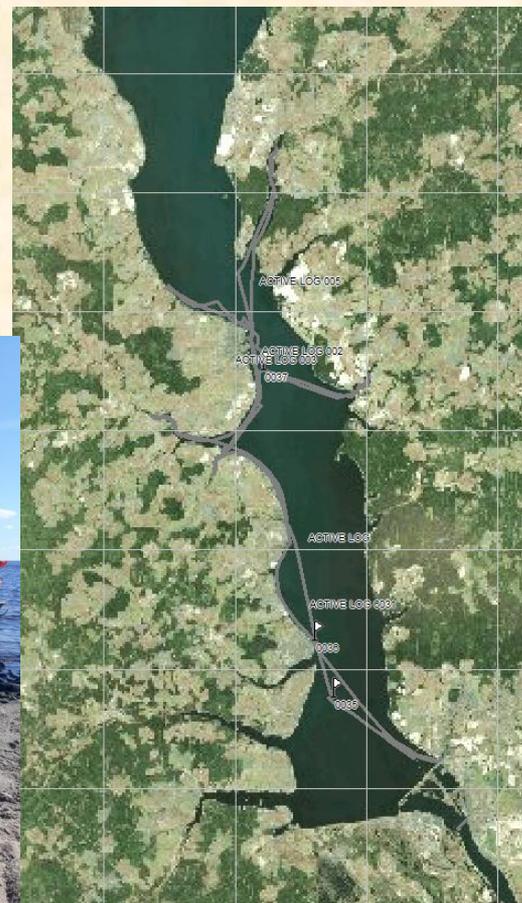
Маршрут



Плавучая лаборатория  
«Геофизик»



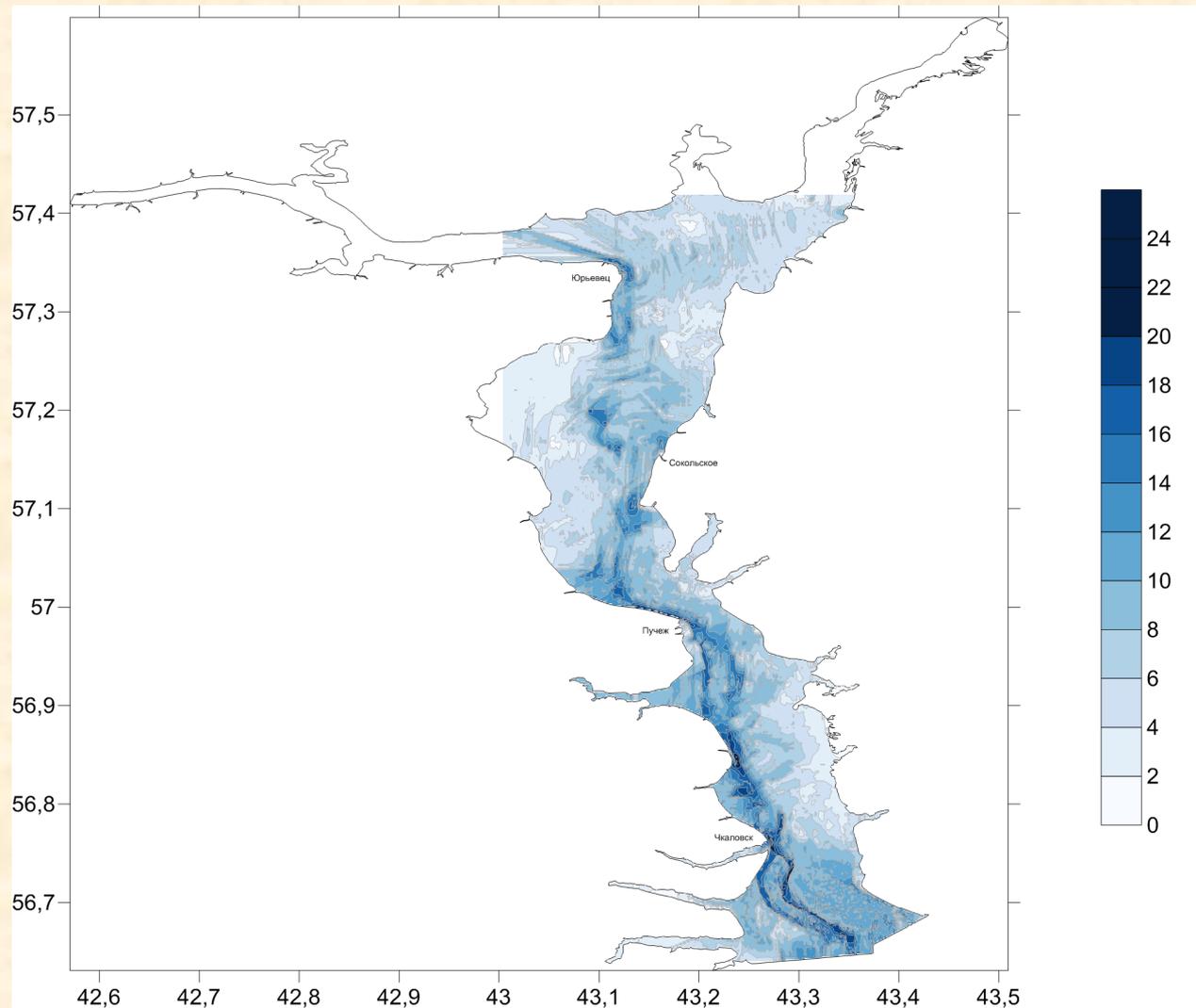
Моторная лодка «Аллюр»



Маршрут

- ADCP-измерения
- STD-измерения
- отбор проб
- Измерения эмиссии метана

# Карта глубин (данные 2014-2017 гг)

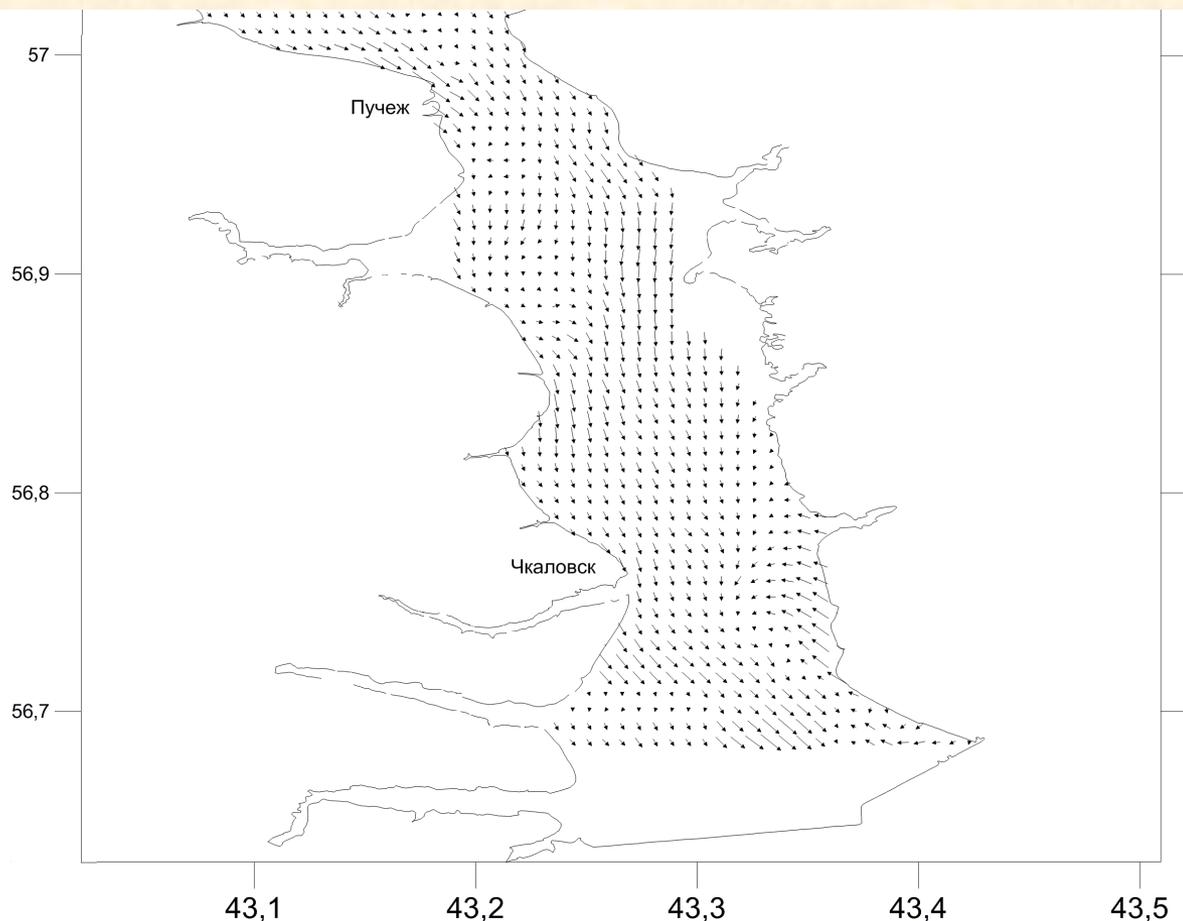


Детализация  
максимальна  
в южной части  
Водохранилища

Хорошо видно  
старое русло Волги

Батиметрия  
во многом  
определяет  
структуру течений...

# Структура средних течений (типичная, при расходе через Нижегородскую ГЭС 1300-1400 м<sup>3</sup>/с по измерениям 30 августа-1 сентября 2017)

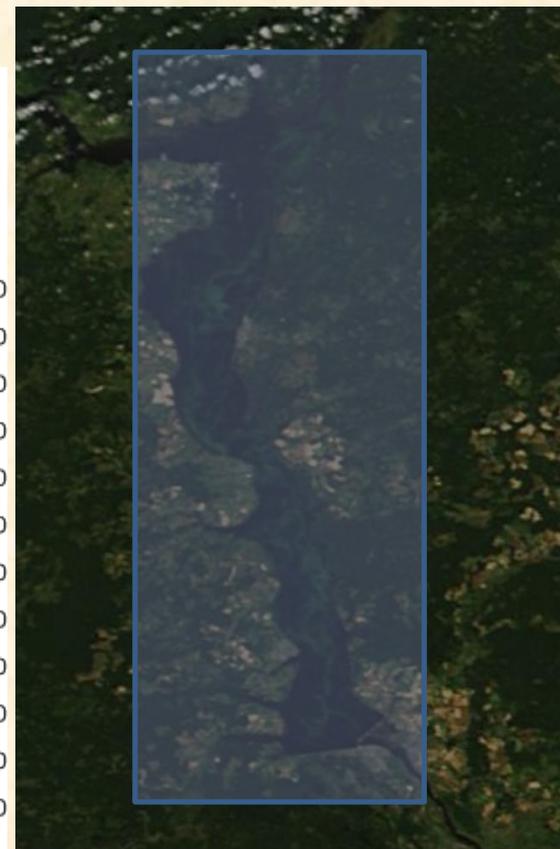
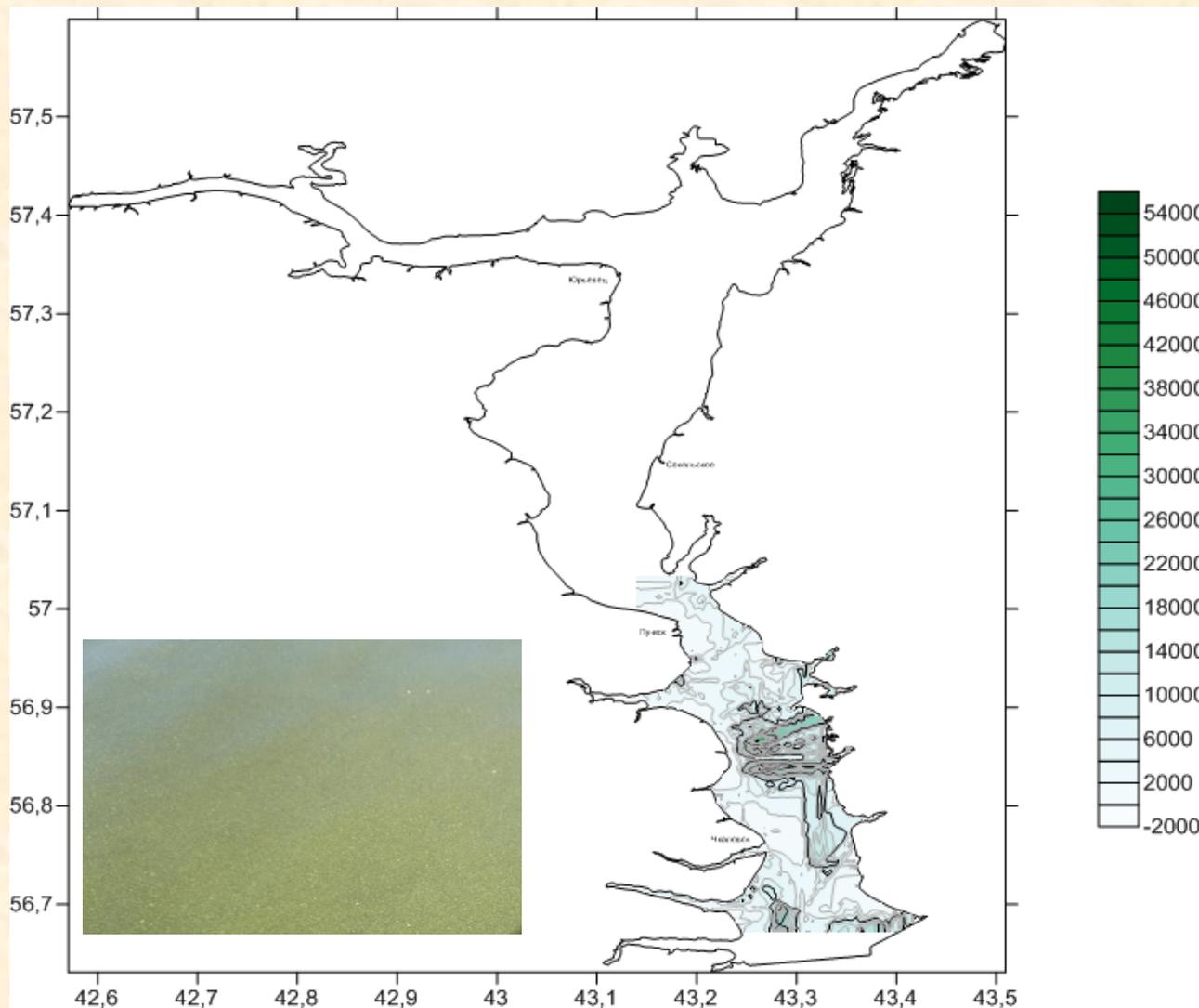


Максимальная  
скорость 18 см/с  
при подходе к плотине

И в районе г. Пучеж  
в русле Волги 15 см/с

р. Волга как и до  
постройки  
ГЭС течет по своему  
руслу

# Распределение концентрации сине-зеленых водорослей 13-16 августа 2017



Повышенная концентрация СЗВ на мелководье, в области слабого течения (пойма Волги)

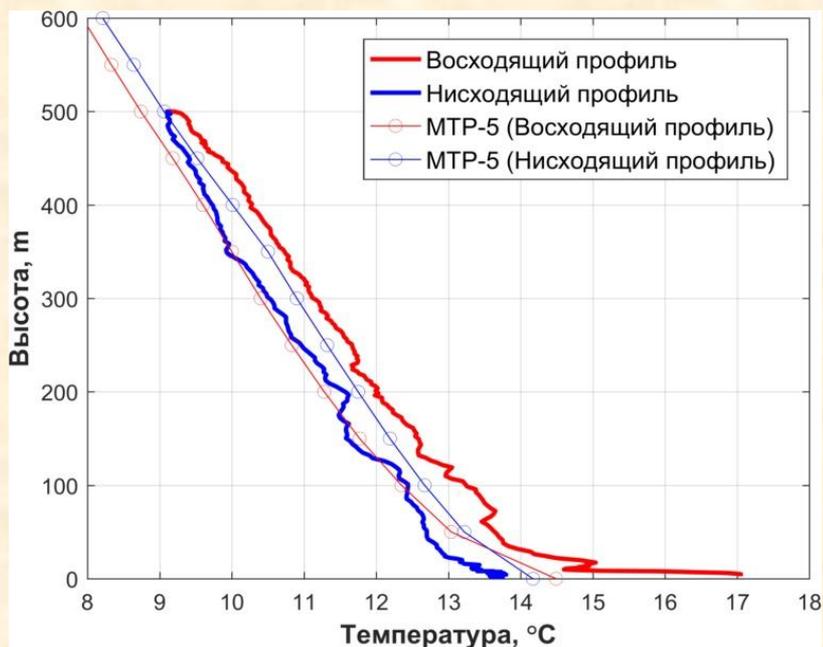
# Использование квадрокоптера для мониторинга пограничного слоя атмосферы

## Квадрокоптер DJI Phanto 4 Pro

- Потолок полета 500 м
- Горизонтальная дальность 1-2 км

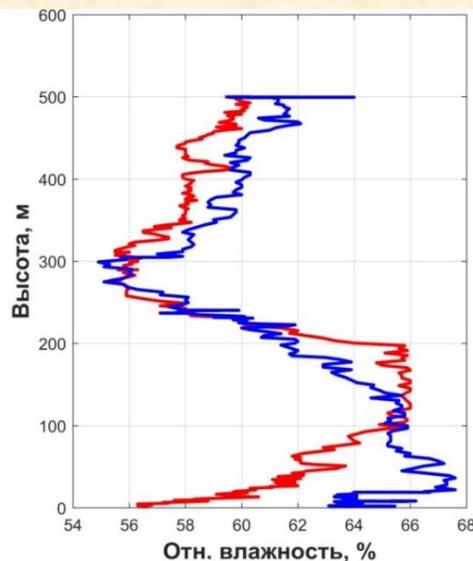
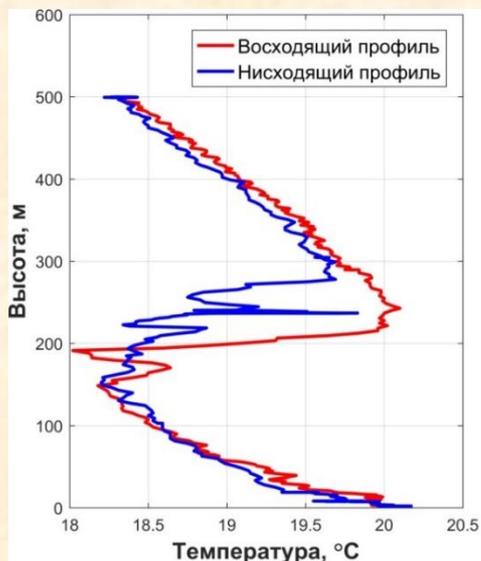
## Датчик intermetystems iMet-XQ

- Измерение температуры (время отклика 2 сек, точность  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ), относительной влажности (время отклика 5 с, точность  $\pm 5\%$ ) давления, GPS-координат.
- Встроенный дата-логгер.
- Тестируются различные варианты установки датчика



Сравнение контактных измерений (квадрокоптер) и дистанционного зондирования (профилемер МТП-5) для условий неустойчивой стратификации над квазиоднородной поверхностью (яйла Ай-Петри)

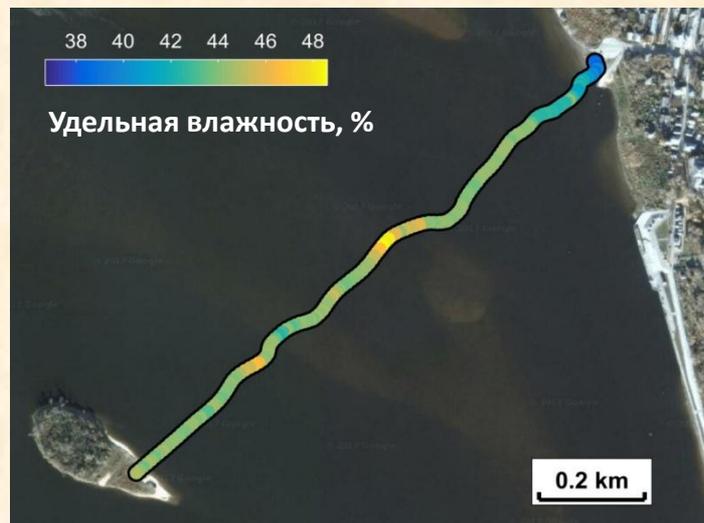
# Использование квадрокоптера для мониторинга пограничного слоя атмосферы



**Вертикальное зондирование утром (7:00) 14 августа в прибрежной зоне Горьковского водохранилища**

**Ближайшие перспективы:**

- Использование комплекса датчиков iMet-XF с большей точностью, меньшим временем отклика и датчиком радиояркой температуры поверхности



**Горизонтальный разрез на высоте  $\approx 100$  м**

# Выводы

- ❖ Водохранилища оказывают влияние на климатические характеристики окружающих регионов.
- ❖ Проточность водоема – важный фактор, определяющий термический и газовый режим водоемов.
- ❖ Анализ содержания растворенных газов в водохранилищах дает возможность считать их региональным источником метана. Интенсивность выделения метана из водохранилища в атмосферу существенно зависит от запаса органического вещества на их дне – эмиссия метана более интенсивна из слабопроточных водохранилищ, донные отложения которых насыщены органикой.
- ❖ Существенное влияние на условия газообмена придонных и поверхностных слоев оказывают морфометрические характеристики, определяющие длину разгона ветра.