

**Определение течений во внутренних водоемах
по последовательным спутниковым
изображениям. Серия натурных
подспутниковых экспериментов в
Горьковском и Куйбышевском
водохранилищах**

Капустин И.А., Мольков А.А., Ермошкин А.В.,
Доброхотова Д.В., Даниличева О.А., Лещев Г.В.

*Институт прикладной физики РАН
Нижегородский государственный университет им. Н.И.
Лобачевского*

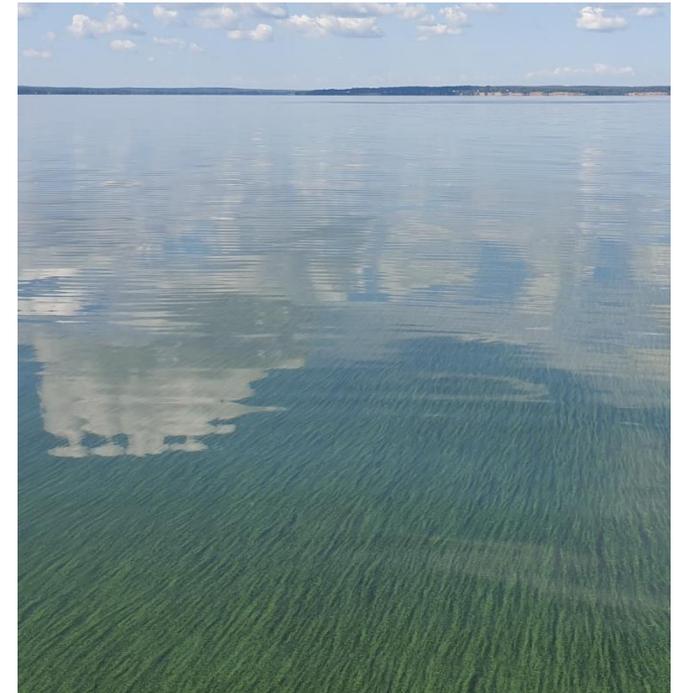
Работы в Куйбышевском водохранилище выполнены при поддержке гранта РФФИ № 23-17-00071, <https://rscf.ru/project/23-17-00071/>.

Работы в акватории Горьковского водохранилища выполнены в рамках проекта госзадания ИПФ РАН (тема 0030-2021-0006).

Введение

Традиционной океанологической проблемой является необходимость определения полей течений на различных акваториях Мирового океана. Весьма привлекательными для решения данной задачи выглядят дистанционные методы, которые активно применяются для обширных акваторий. В частности, с учетом ряда приближений и моделей используются альтиметрические данные, доплеровские инструменты и оптические изображения. Последние зачастую используются в виде последовательностей разнесенных по времени снимков, а в качестве маркеров применяются температурные градиенты, отдельные ледовые образования, слики и зоны цветения фитопланктона. Для внутренних водоемов с высоким уровнем эвтрофирования, зоны цветения оказываются наиболее удобными при рассмотрении их пространственного смещения на изображениях спутниковых сканеров цвета высокого пространственного разрешения.

В настоящей работе представлены результаты серии удачных подспутниковых экспериментов по определению полей течений в акваториях Горьковского и Куйбышевского водохранилищ. Проведено сравнение результатов восстановления полей течений по последовательным спутниковым изображениям различных сканеров цвета с результатами прямых ADCP-измерений течений и с учетом неравномерности сброса через ГЭС, ветрового форсинга и неравномерного прогрева поверхности водоема. Проанализированы возможные ограничения метода для внутренних эвтрофных водоемов.



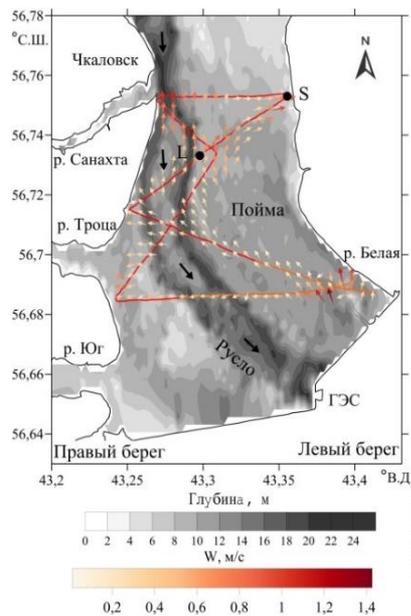
НАТУРНЫЕ ПОДСПУТНИКОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Горьковское водохранилище

06.08.2022 (09:18-14:54)



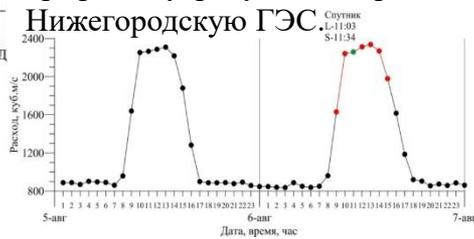
Плавучая лаборатория «Геофизик»



Карта глубин южной части Горьковского водохранилища с наложенным треком судна и поле приводного ветра над акваторией водохранилища (на высоте 7 м).

Красная часть трека соответствует времени максимального суточного расхода через ГЭС. Точкой и буквами L и S отмечены моменты спутниковой съемки в привязке к судовым измерениям. Черные стрелки показывают среднее направление течения на русле

График внутрисуточного расхода воды через Нижегородскую ГЭС.



Красные точки- период проведения измерений. Зеленая точка – момент пролета спутника с точностью до часа.

Куйбышевское водохранилище

28.07.2023 (10:00-12:07) 13.09.2023 (8:10-18:00)



Экспедиционная яхта «Алиса»

Условия:

- ясно,
- неоднородность цветения фитопланктона,
- ветер:

06.08.2022- штиль

28.07.23 – 2 м/с, порывы до 3.5 м/с

13.09.23 – 3 м/с, порывы до 5 м/с

← Аппаратура: →

- Течение: ADCP WorkHorse 1200 kHz
- Ветер: Windsonic
- Хлорофилл«а»: СТД-зонд YSI EXO 2

СПУТНИКОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

сканеры высокого разрешения Landsat-9/OLI и Sentinel-2A/MSI

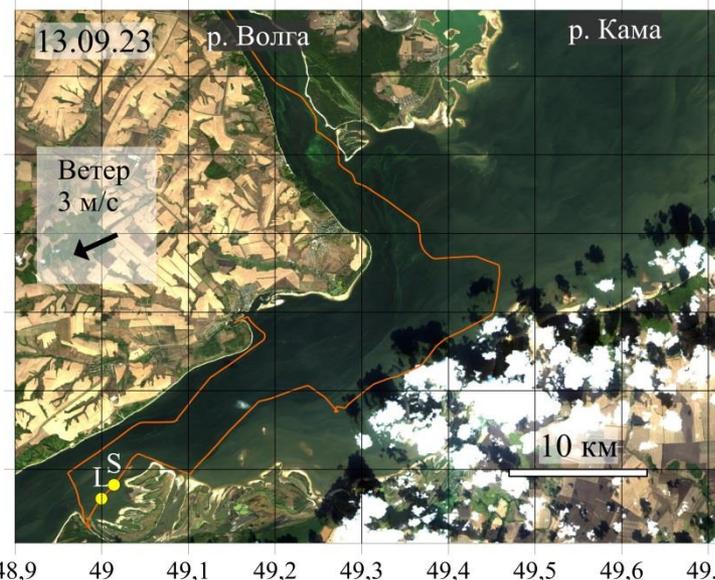
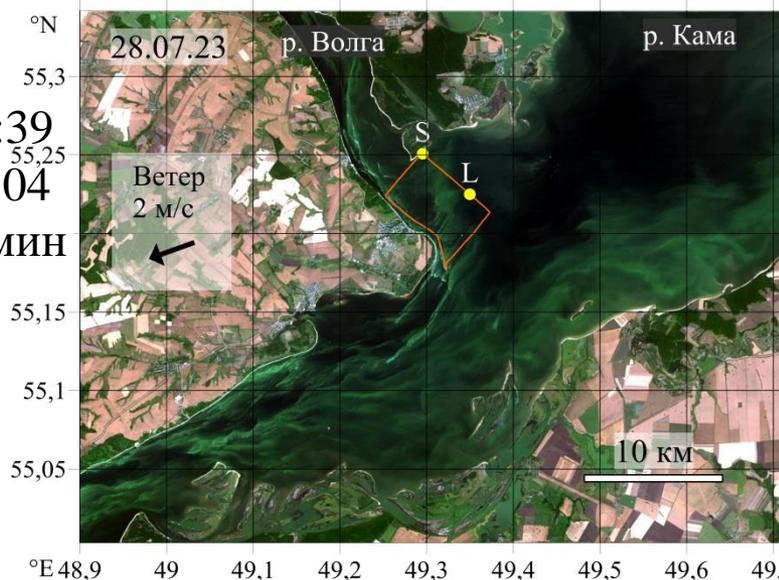
L – 11:04
S – 11:34
 $\Delta = 30$ мин



Landsat-9/OLI (L)		Sentinel-2/MSI (S)	
Номер канала	Ширина полосы	Номер канала	Ширина полосы
2	0.45-0.51	2	0.46-0.52
3	0.53-0.59	3	0.54-0.58
4	0.64-0.67	4	0.65-0.68
5	0.85-0.88	8A	0.85-0.88

Единое пространственное разрешение в 30 м
 → поиск максимума корреляционной матрицы
 между двумя последовательными окнами
 размером 16 x 16 пикселей (480 x 480 м)
 → восстанавливался вектор скорости течения в
 окне

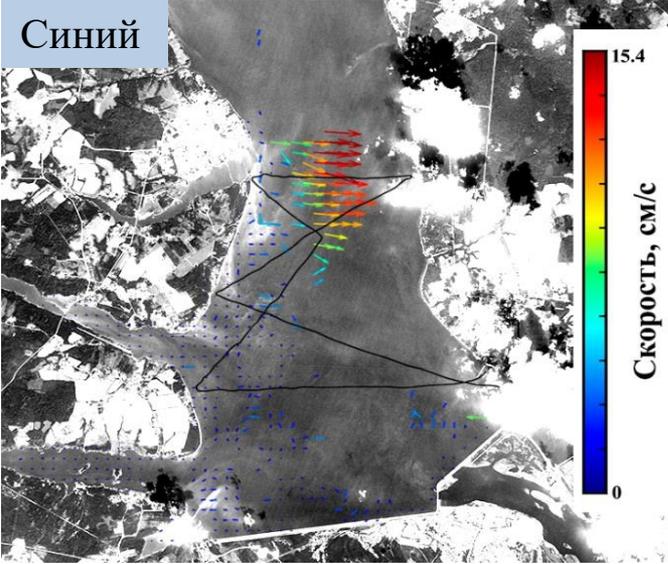
L – 10:39
S – 11:04
 $\Delta = 25$ мин



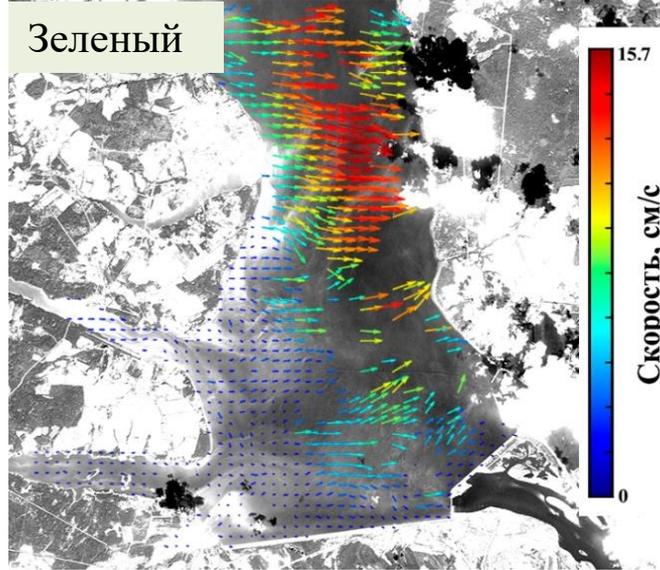
L – 10:45
S – 10:54
 $\Delta = 8$ мин

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ (Горьковское вдхр.)

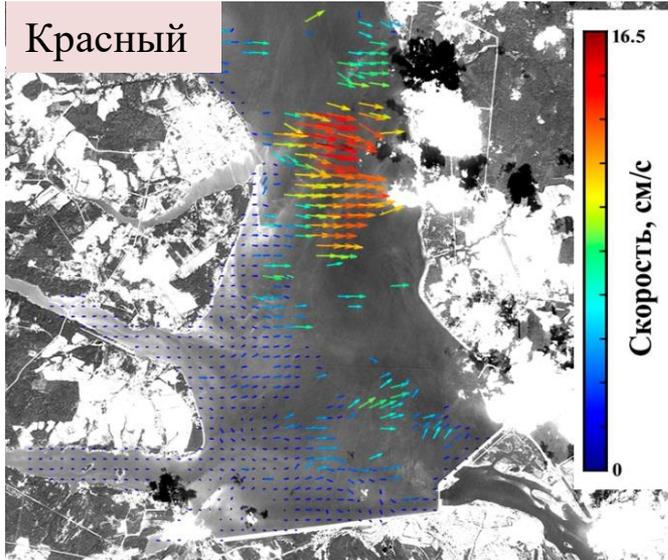
Синий



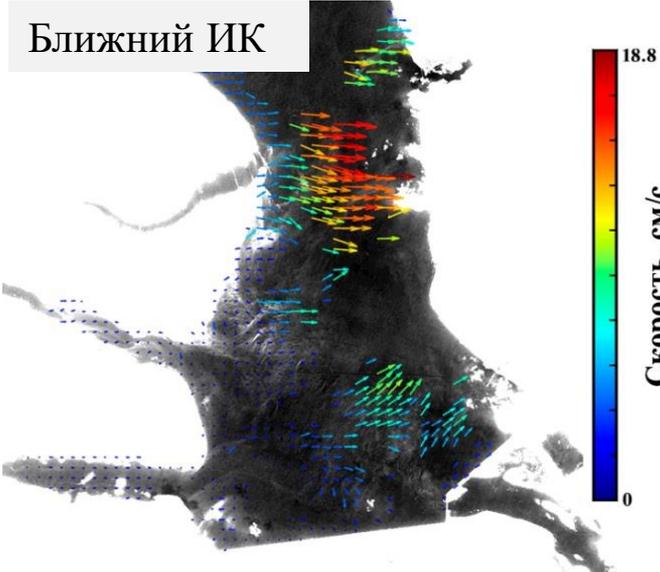
Зеленый



Красный

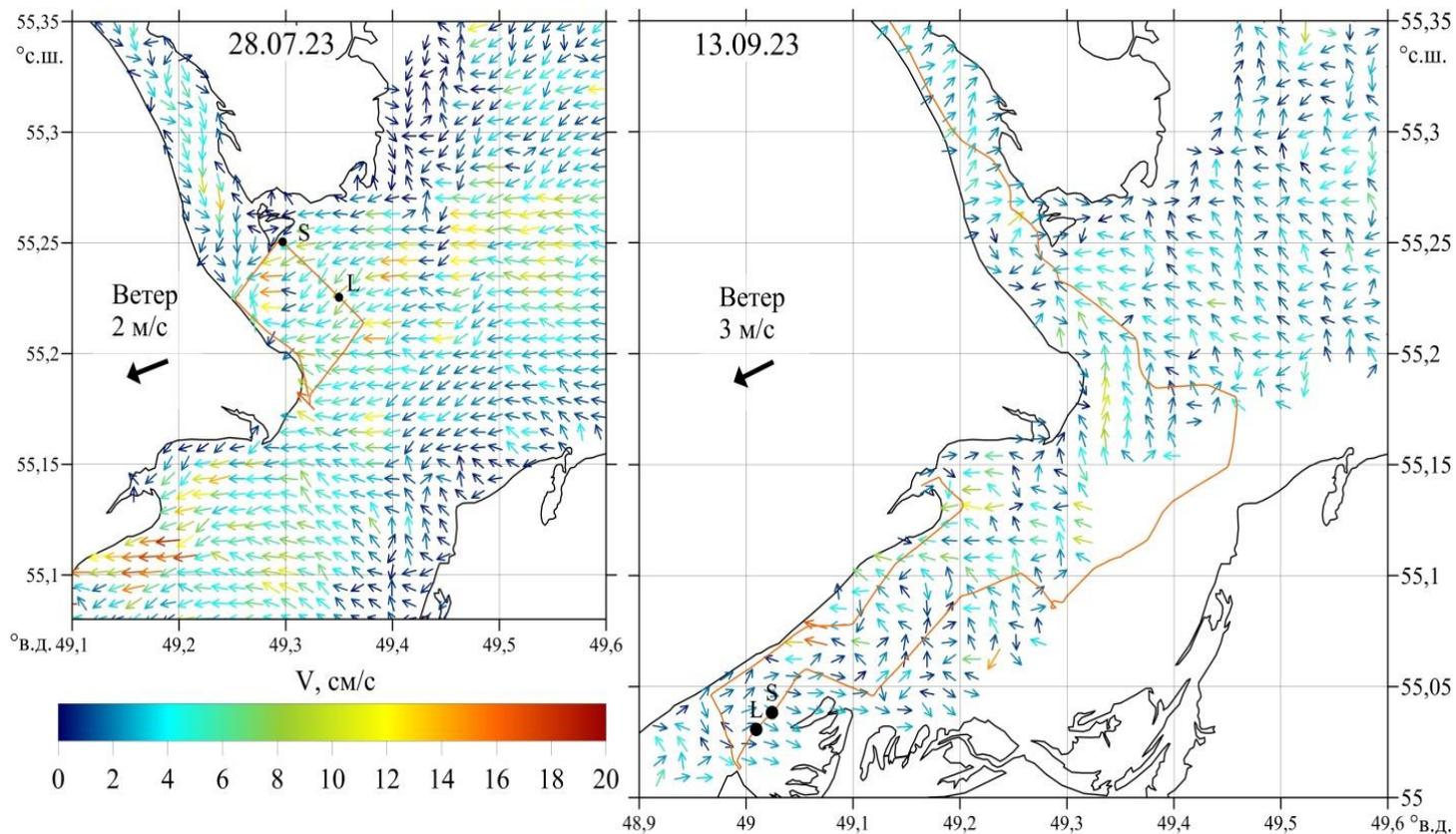


Ближний ИК



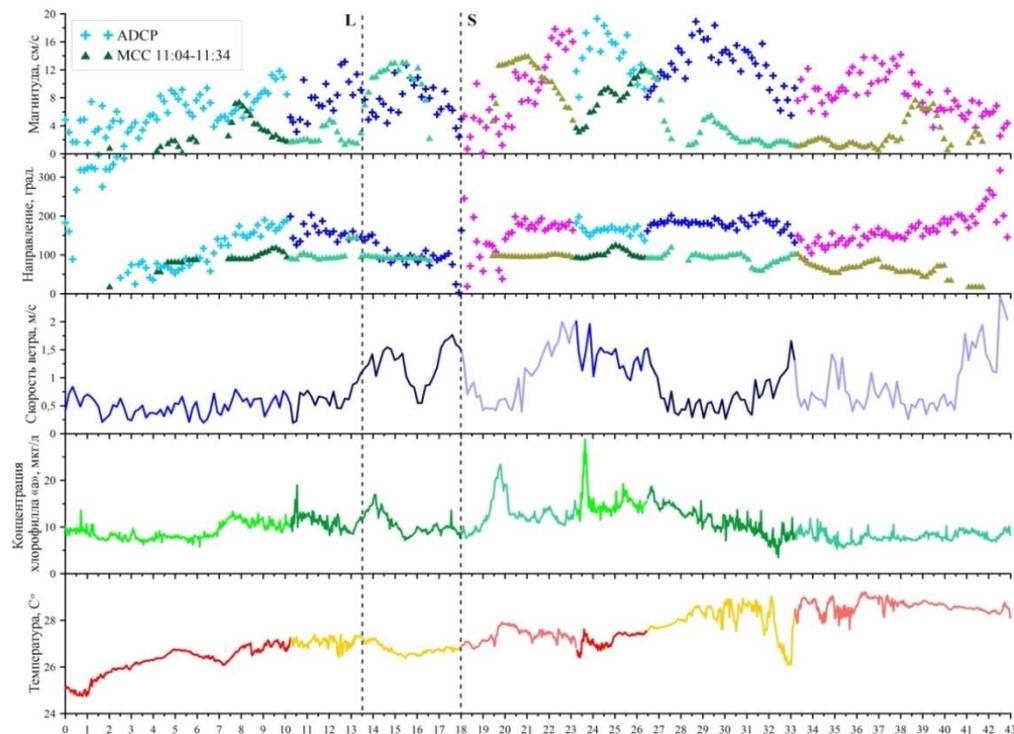
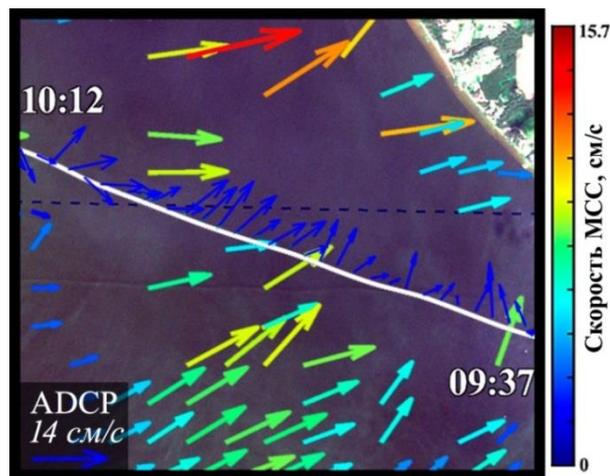
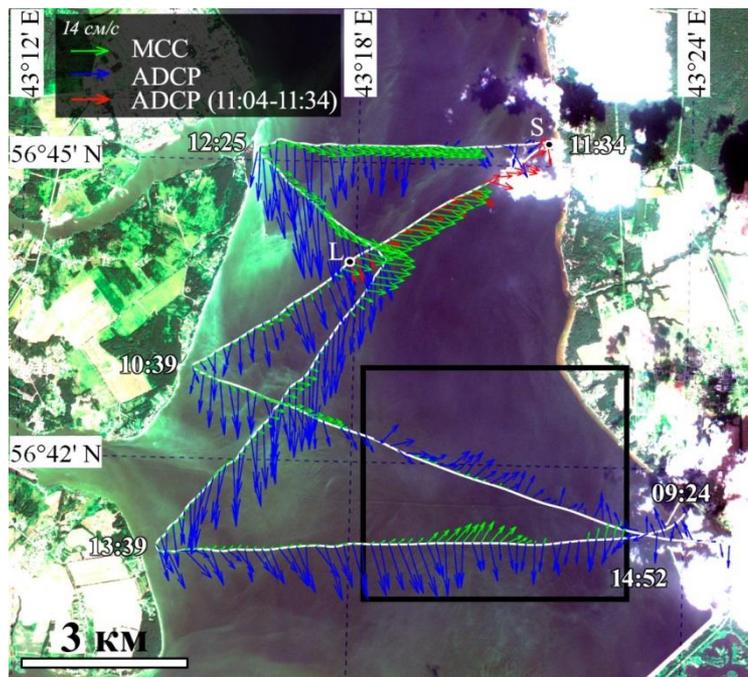
Для различных каналов видно существенное различие в размере области, где удалось восстановить течение. Наилучший результат получен для зеленого канала по той причине, что зеленый свет, наиболее глубоко проникая в толщу воды, проявляет в изображении фитопланктон с более глубоких горизонтов, благодаря чему достигается большее количество маркеров, необходимых для реализации МСС метода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ (Зеленый канал; Куйбышевское вдхр.)



При схожем ветре восстановленные течения в приповерхностном слое 28.07 и 13.09 имеют различные направления. 13 сентября восстановленные течения более хаотичны, по сравнению с течением 28 июля, нет единых выраженных потоков. Магнитуда скоростей в сентябре ниже значений скоростей в июле.

СРАВНЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МСС И ADCP (0.8 м) 06.08.22

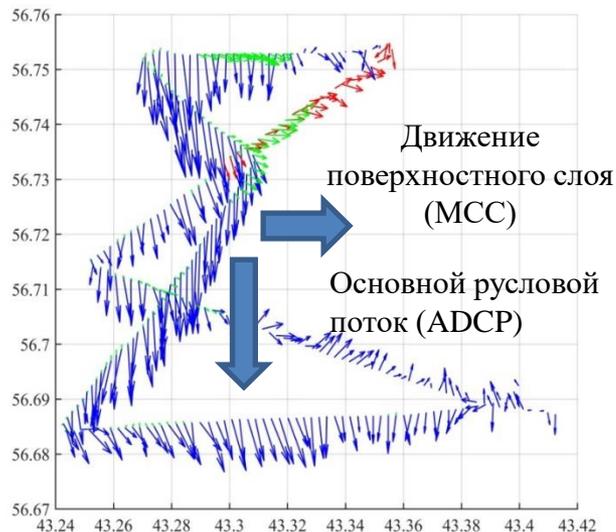


Временные серии данных по ADCP и МСС, скорость ветра, концентрация хлорофилла-а, температура(0,5м), полученные вдоль трека судна

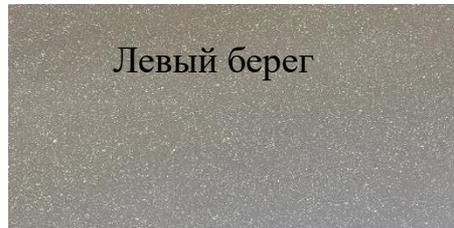
Наилучшее согласие данных ADCP и МСС наблюдается на пойме в области относительно слабого цветения в момент между пролетами спутников (участок LS), а также вблизи маяков (данные несколько разнесены по времени)

ПРИЧИНЫ РАСХОЖДЕНИЯ ДАННЫХ ADCP и МСС

06.08.22

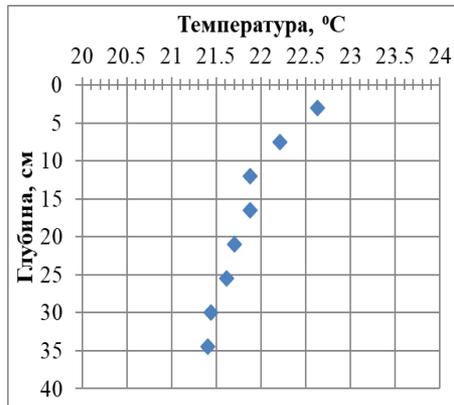
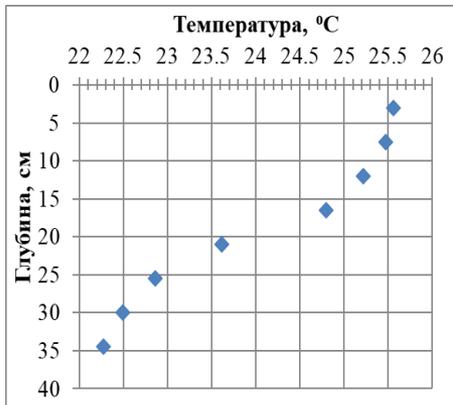


- Значительные различия в глубине видимости диска Секки, на участке LS и на пойме 1,5-2 м (верхний горизонт ADCP в этом диапазоне). У правого берега в областях интенсивного цветения 0,2-0,7 м, то есть в различных частях акватории в зависимости от поверхностной концентрации фитопланктона (и наличия сплошного «ковра») методика МСС видит различные горизонты.
- При высокой поверхностной концентрации фитопланктона происходит интенсивный нагрев тонкого поверхностного слоя и может возникать вертикальная стратификация.



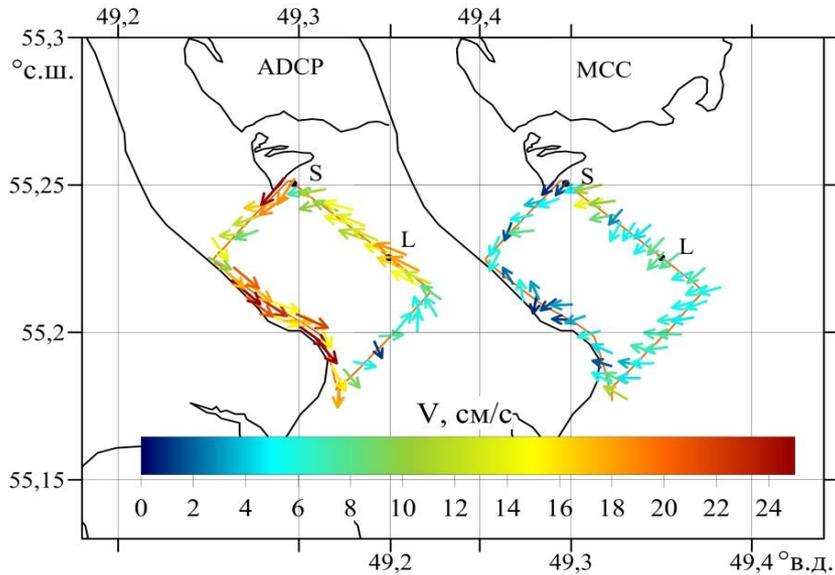
Оценки Ri и Re для условий эксперимента:

- Для ν порядка 10 см/с, перегрева 10 градусов, при толщине слоя более 1 см $Ri > 1$ то есть такая стратификация устойчива
- Оценка Re для слоя дает порядка 10^3 , то есть движение («растекание») перегретого слоя происходит в квазиламинарном режиме

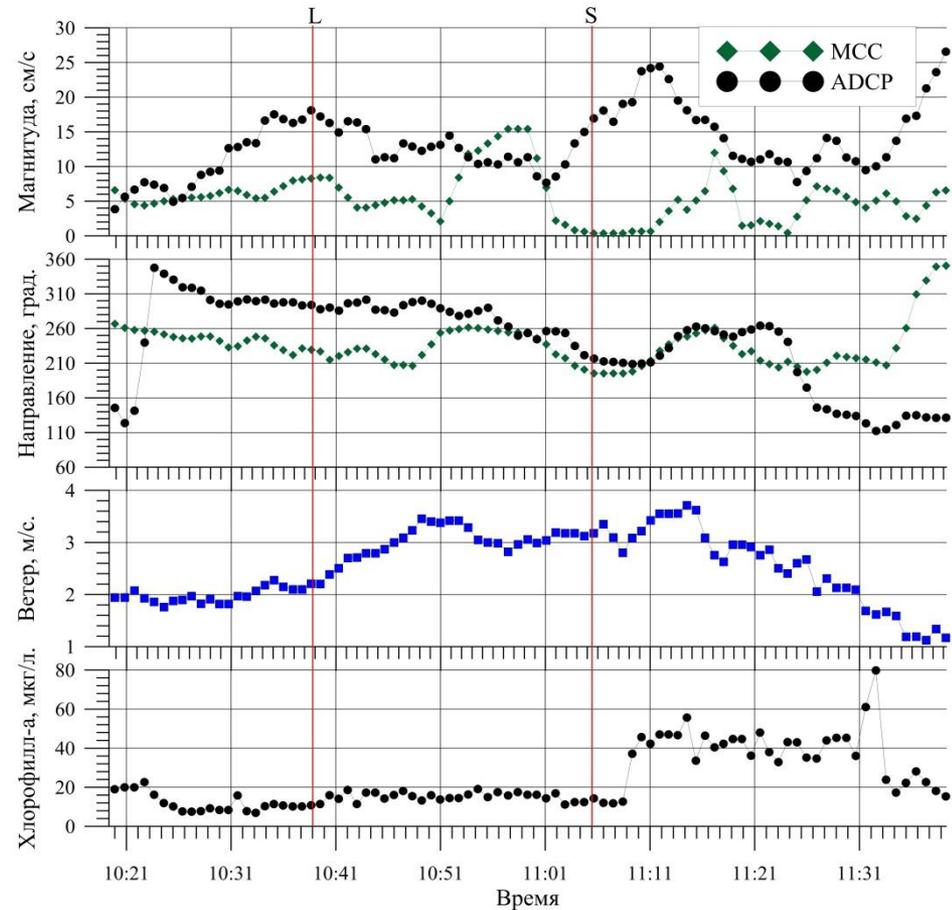


Фотографии поверхности Горьковского водохранилища с разной концентрацией фитопланктона и соответствующие профили температур (данные за август 2023 г.)

СРАВНЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МСС И ADCP (1 м) 28.07.23

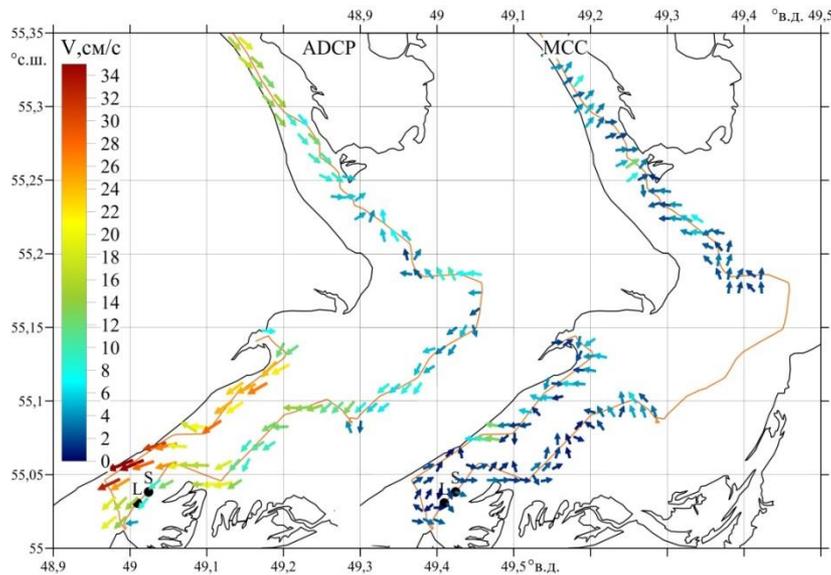


Хорошее согласие по направлению при увеличении скорости ветра выше 3 м/с. При такой скорости ветра возбуждается слабое поверхностное волнение, и, согласно наблюдениям, поверхностная корка из фитопланктона начинает разрушаться и перемешиваться, позволяя свету проникать в более глубокие слои. При этом глубины измерения течений ADCP и MCC могут становиться ближе.

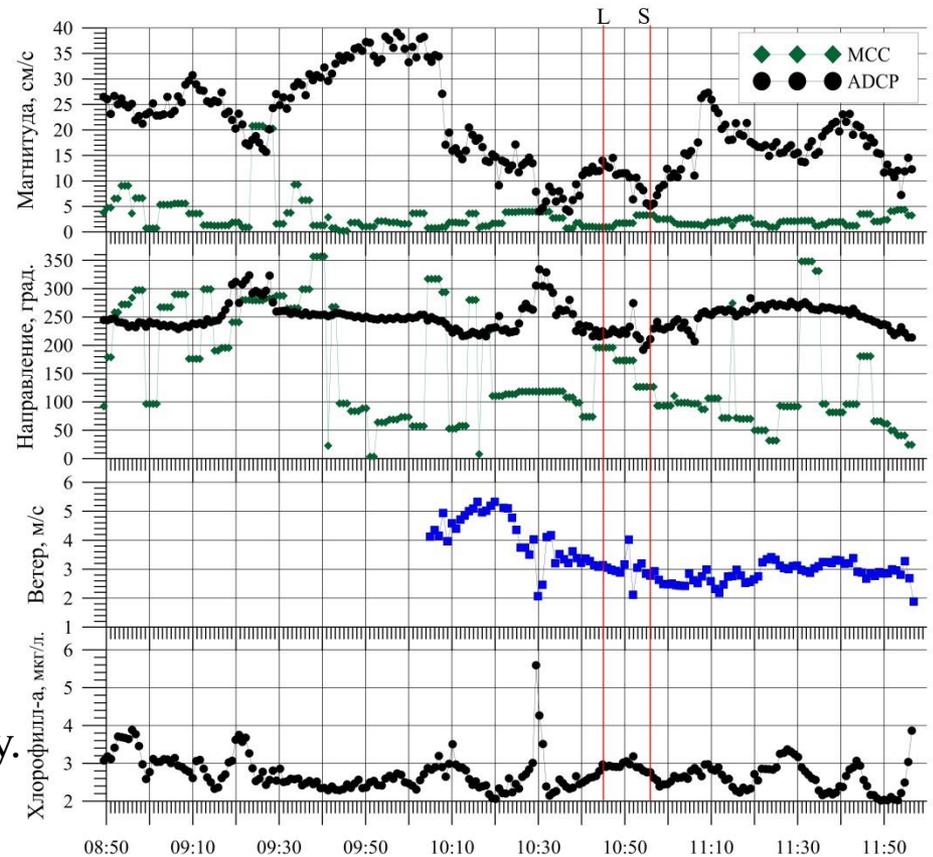


Временные серии данных по ADCP и MCC, скорость ветра, концентрация хлорофилла-а, полученные вдоль трека судна. Температура воды (24 °C) была постоянной

СРАВНЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МСС И ADCP (1 м) 13.09.23



Лучшее соответствие направления скоростей наблюдается в месте слияния рек, где течение направлено вверх по руслу. Эта область характеризовалась большей концентрацией хлорофилла относительно остальной акватории водохранилища (6-12 мкг/л и до 5 мкг/л), но здесь, однако, уже нужно учитывать значительное разнесение по времени между пролетом спутника



Временные серии данных по ADCP и МСС ближайšie к пролету спутника, скорость ветра, концентрация хлорофилла-а, полученные вдоль трека судна. Температура воды (16 °С) была постоянной

ПРИЧИНЫ РАСХОЖДЕНИЯ ДАННЫХ ADCP и МСС

(28.07.23 и 13.09.23)

- Измерения ADCP 28.07.23 вблизи правого берега Волги демонстрируют увеличение скорости, а также высокое содержание хлорофилла “а”, который согласно наблюдениям и спутниковым изображениям был распределен относительно однородно вдоль руслового течения на большом расстоянии. За счет того, что область равномерного распределения фитопланктона превышала в несколько раз размер окна, в котором считалась корреляционная матрица, восстановление течений по смещению фитопланктона вдоль русла, равномерно покрытого фитопланктоном, затруднительно.
- При сравнении восстановленных течений с измеренными течениями 13.09.23 можно видеть резкие изменения направлений восстановленного по МСС течения, а магнитуда скорости по ADCP выше восстановленной скорости более чем в 3 раза. При низкой концентрации маркеров в большей части акватории скорость ветра не оказывает существенного влияния на возможность восстановления течений методом МСС (поскольку маркеров мало то и перемешивать нечего).
- Кроме низкой концентрации хлорофилла «а», на возможность восстановления течений 13.09.23 существенно повлиял временной интервал между спутниковыми снимками: 8 мин. Смещение маркеров за короткий промежуток времени меньше шага, с которым соседние окна перекрывали друг друга. При этом модификация стандартной обработки, заключающаяся в уменьшении окна или области перекрытия окон, не дала желаемого результата.



ВЫВОДЫ

Проведены успешные подспутниковые эксперименты, которые показали возможность применения МСС для небольших внутренних эвтрофированных водоемов, при этом выявлены проблемы и трудности применения метода. Как показывают данные наших первых измерений, условием применимости стандартного МСС является:

- присутствие маркеров течения, в данном случае фитопланктона, характеризуемого неким пороговым значением концентрации хлорофилла “а”. Грубая оценка порогового значения лежит в пределах 5-6 мкг/л.
- маркеры должны быть перемешаны по глубине. Другими словами, отсутствие плотной поверхностной корки из фитопланктона, за счет которой в штилевых условиях (корка разрушается при наличии ветра более 3 м/с) тонкий поверхностный слой может двигаться по законам отличным от основного руслового потока, вероятно, из-за наличия устойчивой сильной вертикальной стратификации в тонком приповерхностном слое (перегретый слой) в зонах интенсивного цветения.
- наличие мелкомасштабных (по сравнению с размером окна) неоднородностей в структуре фитопланктона на спутниковых изображениях, в том числе, неоднородностей, ориентированных поперек исследуемого потока,
- временной интервал между изображениями в паре должен быть достаточным для смещения маркеров на расстояние превышающее размер перекрытия соседних окон. В частности, при использовании стандартного подхода, в нашем случае, это время должно превышать 20-25 минут. Однако очевидно, что если временной интервал будет слишком продолжительным, то методика также не будет работать, поскольку может полностью пропасть корреляция между структурами на изображениях в паре.