

УДК 551.463.5

@ И. А. Капустин^{1-3*}, А. А. Мольков¹⁻³, А. В. Ермошкин^{1,2}, Д. В. Доброхотова^{1,2}, О. А. Даниличева^{1,2},
Г. В. Лещев^{1,2}, 2024

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, ул. Ульянова, д. 46, Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, проспект Гагарина, д. 23, Нижний Новгород

³Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, ул. Нестерова, д. 5, Нижний Новгород

*kia@ipfran.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 13.11.2023, после доработки 21.11.2023, принята в печать 11.12.2023

Аннотация

Работа посвящена серии первых натурных подспутниковых экспериментов, проведенных в акватории Куйбышевского водохранилища (Камском устье) в 2023 году. Одновременно с судовыми измерениями полей течений и ветра, а также концентрации хлорофилла «а», два спутниковых сканера высокого пространственного разрешения осуществили съемку исследуемого района водохранилища. По последовательным изображениям были восстановлены поля течений стандартным методом максимума кросс-корреляции (МСС), которые затем сравнивались с измерениями акустическим доплеровским профилографом течений (ADCP). В отдельных частях акватории было получено удовлетворительное согласие между восстановленными течениями и данными прямых измерений. А в тех частях акватории, где было зарегистрировано существенное расхождение данных ADCP и МСС, были проанализированы возможные причины расхождений. Сделаны предварительные оценки параметров, оказывающих существенное влияние на возможность восстановления течений методом МСС во внутренних эвтрофированных водоемах, и выявлены некоторые ограничения метода МСС в целом. Проанализированы возможные пути дальнейшего развития метода.

Ключевые слова: течения, фитопланктон, внутренние водоемы, оптические спутниковые изображения, ADCP-измерения, подспутниковый эксперимент

UDC 551.463.5

@ I. A. Kapustin^{1-3*}, A. A. Molkov¹⁻³, A. V. Ermoshkin^{1,2}, D. V. Dobrokhotova^{1,2}, O. A. Danilicheva^{1,2},
G. V. Leshchev^{1,2}, 2024

¹Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod, 603022, Russia

³Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

*kia@ipfran.ru

RECONSTRUCTION OF THE CURRENTS STRUCTURE IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR USING SATELLITE DATA AND FIELD MEASUREMENTS

Received 13.11.2023, Revised 21.11.2023, Accepted 11.12.2023

Abstract

This paper is devoted to a series of the first field subsatellite experiments conducted in the waters of the Kuibyshev Reservoir (Kama estuary) in 2023. Simultaneously with ship-based measurements of current and wind fields, as well as chlorophyll-a concentration, two high-spatial-resolution satellite scanners surveyed the study area of the reservoir. From sequential images, current fields were reconstructed using the standard maximum cross-correlation (MCC) method, which were then compared with measurements from the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). In certain parts of the water area, satisfactory agreement was

Ссылка для цитирования: Капустин И.А., Мольков А.А., Ермошкин А.В., Доброхотова Д.В., Даниличева О.А., Лещев Г.В. Восстановление структуры течений в Куйбышевском водохранилище с использованием спутниковых данных и натурных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5

For citation: Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermoshkin A.V., Dobrokhotova D.V., Danilicheva O.A., Leshchev G.V. Reconstruction of the Currents Structure in the Kuibyshev Reservoir Using Satellite Data and Field Measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5

obtained between the reconstructed currents and direct measurement current data. And in those parts of the water area where a significant discrepancy between the ADCP and MCC data was recorded, the possible reasons for the discrepancies were analyzed. Preliminary estimates of the parameters that have a significant impact on the possibility of reconstructing currents using the MCC method in inland eutrophicated water bodies have been made, and some limitations of the MCC method as a whole have been identified. Possible ways of further development of the method are analyzed.

Keywords: currents, phytoplankton, inland water, optical satellite imagery, ADCP measurements, sub-satellite experiment

1. Введение

Определение структуры течений во внутренних водоемах — важная океанографическая проблема, поскольку течения играют определяющую роль в процессах переноса вещества, водной массы, накоплении осадков и создании определенных условий для существования различных организмов [1]. Для открытых районов океанов и морей в настоящее время активно применяются различные спутниковые методы восстановления структуры течений, в частности, альтиметрические (см., например, [2, 3]). Так, скорости и структура течений восстанавливаются с хорошей точностью на масштабах порядка и более 10 км на основе географического приближения, хорошо применимого в отдельных районах Мирового океана.

Альтернативный способ дистанционного восстановления течений основан на использовании последовательных спутниковых изображений в оптическом и инфракрасном диапазонах, предполагающий специализированную обработку пар изображений, по которым определяется смещение лагранжевых маркеров, которое отождествляется с течением верхнего слоя [4–10]. В качестве лагранжевых маркеров при этом могут выступать отдельные ледовые образования, температурные градиенты, неоднородности поверхностного волнения (например, слики) и контрастные зоны цветения фитопланктона [11]. Математический аппарат обработки изображений базируется на методе максимальной взаимной корреляции (МСС — Maximum Cross Correlation). Применение данного метода к внутренним водоемам и прибрежной зоне моря выглядит перспективным, в частности, при использовании данных с высоким пространственным разрешением. В работе [12] была продемонстрирована возможность восстановления течения по данным низкого разрешения MODIS в одном из крупных внутренних водоемов — Ладожском озере. Но метод МСС имеет свои особенности и ограничения, связанные в ряде случаев с самим методом для сканеров низкого разрешения и для больших акваторий (см., например, в [13, 14]). Ограничения также могут быть связаны с особенностями исследуемой акватории (см., например, в [15] распространение мутных речных вод в морском заливе). Все это указывает на необходимость дальнейшего развития метода.

Очевидно, что применение любых спутниковых методов требует наземной верификации и валидации. В части определения течений для этого применяются прямые измерения, проводимые синхронно со спутниковой съемкой. Для таких измерений используются различные датчики (акустические доплеровские профилографы течений (ADCP — Acoustic Doppler Current Profiler) — стационарные и судовые) и плавающие самопишущие буйковые станции, движущиеся непосредственно в районе съемки [16, 17].

Целью работы является исследование возможностей восстановления структуры течений во внутренних эвтрофных водоемах с использованием стандартной МСС обработки последовательных спутниковых изображений, верификация полученных результатов путем сравнения с прямыми подспутниковыми измерениями и выявление возможных ограничений метода в условиях внутренних водоемов. Работа также нацелена на поиск возможных путей модернизации МСС метода для внутренних водоемов.

Настоящая работа посвящена серии первых натурных подспутниковых экспериментов, проведенных в акватории Куйбышевского водохранилища (Камском устье) в 2023 году. Следует отметить существенную сложность и вероятностный характер успешного проведения таких экспериментов, поскольку они сильно зависят от погодных условий и облачности. Тем не менее, в 2023 году удалось осуществить два эксперимента непосредственно в период спутниковой съемки, что делает полученные данные весьма ценными.

2. Описание натурных экспериментов

2.1. Подспутниковые измерения и условия экспериментов

В 2023 году на Куйбышевском водохранилище было осуществлено два удачных подспутниковых эксперимента 28.07 (10:00–12:07) и 13.09 (8:10–18:00). Одновременно с судовыми измерениями сканеры высокого разрешения Landsat-9/OLI и Sentinel-2A/MSI (далее L и S соответственно) осуществили съемку исследуемого района водохранилища: 28 июля в 10:39:39 (L) и 11:04:50 (S) (интервал 25 мин), 13 сентября в 10:45:40 (L) и 10:54:30 (S) (интервал 8 мин). Оба дня характеризовались ясной погодой с незначительной облачностью 13.09, частично покрывающей часть Куйбышевского вдхр. на спутниковых снимках.

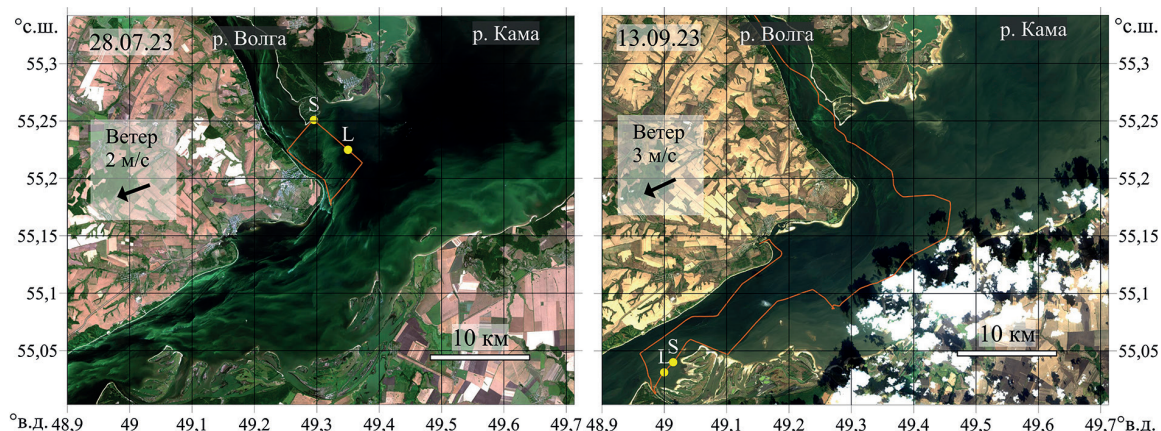


Рис. 1. Композитные RGB-изображения Landsat-9/OLI Куйбышевского водохранилища 28.07.23 (слева) и 13.09.23 (справа) с наложенным треком судна. Стрелками отмечено среднее направление ветра. Положения судна в моменты спутниковой съемки обозначены точками L и S

Fig. 1. Composite RGB images of Landsat-9/OLI of Kuibyshev reservoir from 28.07.23 (left) and from 13.09.23 (right) with superimposed ship track. The arrows indicate the average wind direction. Boat positions at the moments of satellite imagery are marked by points L and S

Согласно измерениям ультразвукового анемометра Windsonic, установленного на судне, скорость ветра 28 июля не превышала 3,5 м/с, среднее значение во время измерений составляло 2,2 м/с, 13 сентября средняя скорость ветра составляла 3 м/с с порывами до 4 м/с, направления ветра в обоих экспериментах были близки: от северо-восточного до восточного ветра. Измерения скорости и направления течений осуществлялись с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz), установленного на глубине 0,4 м на специальном сварном кронштейне с борта судна. Для измерений гидрофизических параметров верхнего слоя воды (температуры воды и концентрации хлорофилла «а») на глубине 0,15 м использовался СТД-зонд YSI EXO 2, установленный в проточной системе.

На рис. 1 представлены композитные RGB-изображения, на которые наложены треки. Буквами L и S обозначены моменты спутниковой съемки в привязке к судовым измерениям. Стрелками отмечено среднее направление ветра во время натурных измерений.

Как видно из рис. 1, в ходе июльского эксперимента измерениями была затронута часть устья р. Камы (момент спутниковой съемки LS) и русловая часть р. Волги вблизи правого берега. В сентябре измерениями была покрыта обширная акватория, включающая разрезы поперек устья р. Камы и р. Волги ниже по течению, при этом момент спутниковой съемки пришелся на небольшой участок акватории вблизи левого берега Волги.

2.2. Методика обработки изображений

Для восстановления поля поверхностных течений методом МСС были использованы спутниковые снимки 1-го уровня обработки. Глубина зондируемого слоя воды, за счет близких спектральных каналов обоих спутников (табл. 1), считалась одинаковой. Ограничение снимков единым геопривязанным районом и приведение снимков к одному пространственному разрешению (30 м) осуществлялось в платформе для обработки спутниковых данных SNAP [18].

Таблица 1

Table 1

Характеристики спектральных каналов сканеров цвета Landsat-9/OLI и Sentinel-2/MSI

Spectral channel characteristics of Landsat-9/OLI and Sentinel-2/MSI colour scanners

Landsat-9/OLI		Sentinel-2/MSI	
Номер канала	Ширина полосы, мкм	Номер канала	Ширина полосы, мкм
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

Далее изображения разбивались на окна размером 16×16 пикселей (480×480 м), между которыми осуществлялся поиск максимума корреляционной матрицы. При этом учитывалось, что изменение яркости пикселя в паре изображений определяется горизонтальным смещением фитопланктона под действием течений. Выбранный размер окна обусловлен двумя факторами: с одной стороны, для восстановления поля скорости с большим разрешением окно должно быть минимального размера, с другой стороны, для корректного восстановления скоростей размер окна должен превышать смещение неоднородностей. Для определения смещения на границах и углах каждого окна соседние окна перекрывали друг друга на 50 %. Данные с корреляционным коэффициентом ниже 0,5 отсеивались. Учитывая временной интервал между последовательными кадрами и положение максимума корреляционной матрицы, восстанавливался вектор скорости течения в окне.

3. Результаты

Поля течений на Куйбышевском водохранилище восстанавливались для четырех каналов: синий (каналы 2), зеленый (каналы 3), красный (каналы 4) и ближний ИК (каналы 5 (L) и 8A (S)). Лучший результат был получен для зеленого канала, для которого количество окон с корреляционным коэффициентом ниже 0,5 было минимальным. Зеленый свет на изображении проявляет фитопланктон, являющийся в данном случае маркером для МСС метода, с более глубоких горизонтов. На рис. 2 представлены восстановленные поля течений по смещению областей интенсивного цветения фитопланктона на двух последовательных спутниковых оптических изображениях Куйбышевского водохранилища за 28.07.23 и 13.09.23. Частичное отсутствие векторов на рис. 2 (справа) обусловлено облачностью (см. рис. 1 (справа)).

При аналогичных ветровых условиях восстановленные течения в приповерхностном слое 28.07 и 13.09 имеют различные направления. Так, согласно рис. 2 (справа), 13 сентября восстановленные течения более хаотичны по сравнению с течением 28 июля, нет единых выраженных потоков, несмотря на более сильный ветер. Магнитуда скоростей в сентябре ниже значений скоростей в июле. Подобные по структуре течения, но локализованные в меньшем масштабе, наблюдаются вблизи места слияния рек, где в оба дня течение р. Камы направлено в устье Волги, против ее руслового течения. В большей части водохранилища 28 июля течение имеет русловой характер, такое направление течения, впрочем, может усиливаться ветром.

Сравним поля течений, полученные методом МСС для зеленого канала, с полученными с помощью ADCP на верхнем горизонте 1 м в ходе судовых измерений 28.07.23 (рис. 3). На рис. 4 представлены: график зависимости магнитуды и направления (куда) полученного течения с помощью ADCP, результат МСС

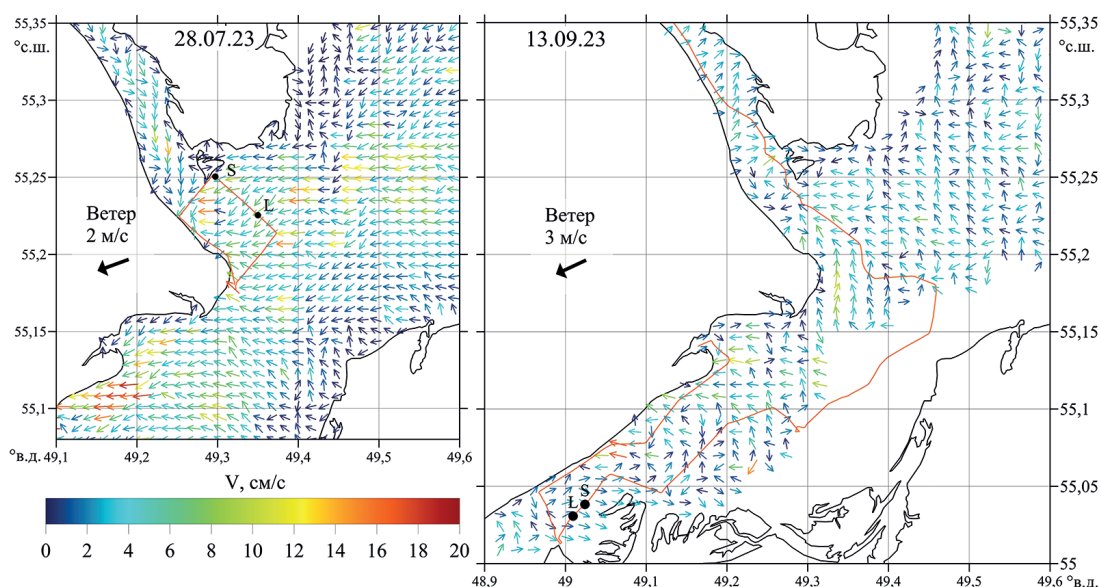


Рис. 2. Восстановленные по спутниковым изображениям (зеленый канал) поля течений на Куйбышевском водхр. 28 июля (слева) и 13 сентября (справа) 2023 года с наложенным треком судна. Черной стрелкой отмечено среднее направление ветра

Fig. 2. Current fields reconstructed from satellite images (green channel) in the Kuibyshev Reservoir. 28 July (left) and 13 September (right) 2023 with superimposed ship track. The black arrow marks the average wind direction

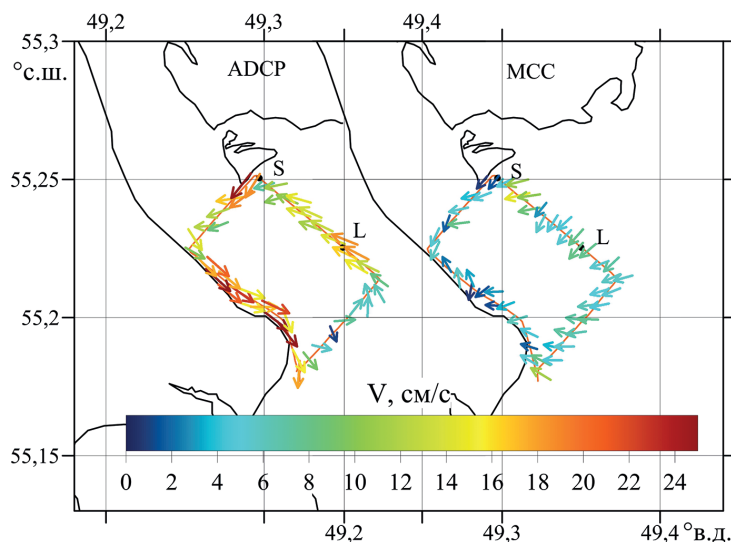


Рис. 3. Сравнение результатов ADCP-измерений течений на глубине 1 м (слева) и результата обработки спутниковых изображений в зеленом канале вдоль трека судна (справа) 28.07.23

Fig. 3. Comparison of ADCP measurements of currents at a depth of 1 m (left) and the result of satellite images processing in the green channel along the ship track (right) 28.07.23

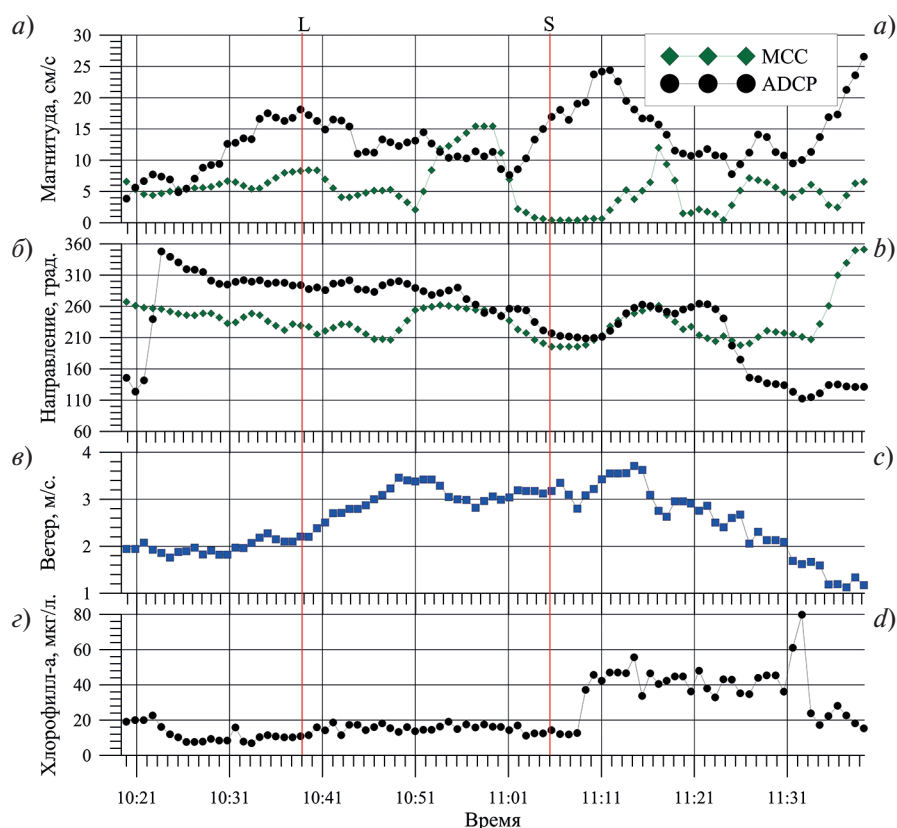


Рис. 4. Графики магнитуды (а) и направления (куда) (б) полученного течения с помощью ADCP, MCC. Графики магнитуды ветра (в), распределения хлорофилла «а» (г) вдоль трека 28.07.23

Fig. 4. Plots of magnitude (a) and direction (where) (b) of the obtained flow using ADCP, MCC. Plots of wind magnitude (c), chlorophyll «a» distribution (d) along the track 28.07.23

для участка за 30 мин до L и 30 мин после S, соответствующие графики магнитуды скорости ветра, а также распределение хлорофилла «а» вдоль трека. Температура воды на большей части трека была постоянной на уровне 24 °С, а ее повышение примерно на 1 °С наблюдалось в области значительного повышения концентрации хлорофилла «а». По данным ADCP вблизи правого берега Волги фиксируется относительно быстрый поток, соответствующий старому руслу Волги.

Как можно видеть, результат восстановления течений методом MCC дает хорошее согласие с данными ADCP по направлению (максимальные значения коэффициента корреляции 0,8) в период с 10:53 до 11:24, т. е. за 10 мин до пролета S, и 20 мин после, что соответствует 30-минутному интервалу увеличения скорости ветра выше 3 м/с. При таких скоростях ветра, даже в условиях плотной поверхностной пленки, на поверхности возбуждается слабое ветровое волнение. И согласно нашим многократным визуальным наблюдениям, поверхностный мат из цианобактерий начинает разрушаться и перемещаться, позволяя свету проникать в более глубокие слои. При этом глубины измерения течений ADCP и MCC могут становиться ближе. Магнитуды восстановленных по MCC скоростей регулярно ниже измеренных ADCP. Из графиков также видно, что дальнейшее падение скорости ветра приводит к еще большему расхождению данных ADCP и MCC, что также может объясняться всплыванием фитопланктона и формированием мата.

Измерения 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, не корректно.

Во втором случае, т. е. 13.09.23, из сравнения поля течений, полученного методом MCC для зеленого канала и с помощью ADCP на горизонте 1 м (рис. 5), можно видеть существенную разницу как в направлении, так и в магнитуде скорости. Наилучшее соответствие направлений скоростей наблюдается в месте слияния рек, где течение направлено вверх по предполагаемому руслу. Эта область характеризовалась несколько большей концентрацией хлорофилла «а» относительно остальной акватории водохранилища (10–12 мкг/л и до 5 мкг/л), но здесь, однако, уже нужно учитывать значительное разнесение по времени между пролетом спутника (10:45–10:54) и измерением ADCP (после 15:05).

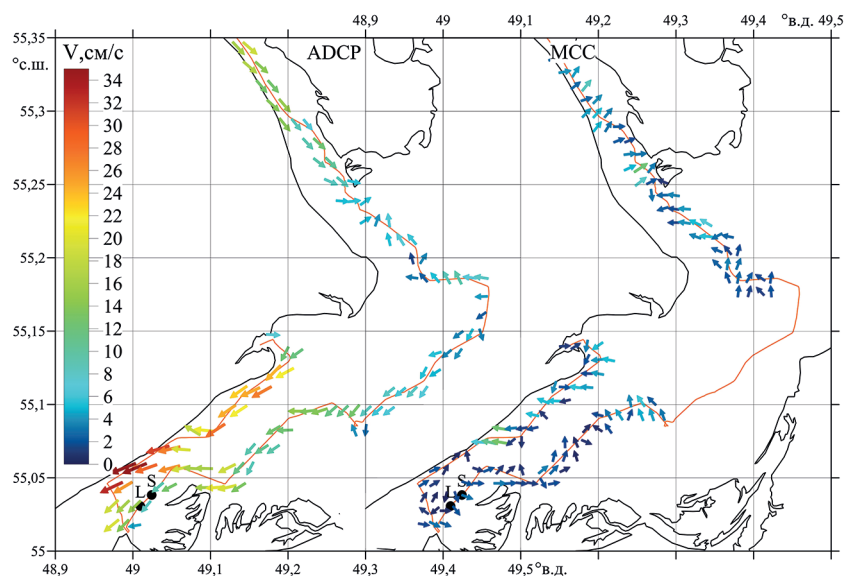


Рис. 5. Сравнение результатов ADCP-измерений течений на глубине 1 м (слева) и результата обработки спутниковых изображений в зеленом канале вдоль трека судна (справа) 13.09.23

Fig. 5. Comparison of the results of ADCP measurements of currents at 1 m depth (left) and the result of satellite images processing in the green channel along the ship track (right) 13.09.23

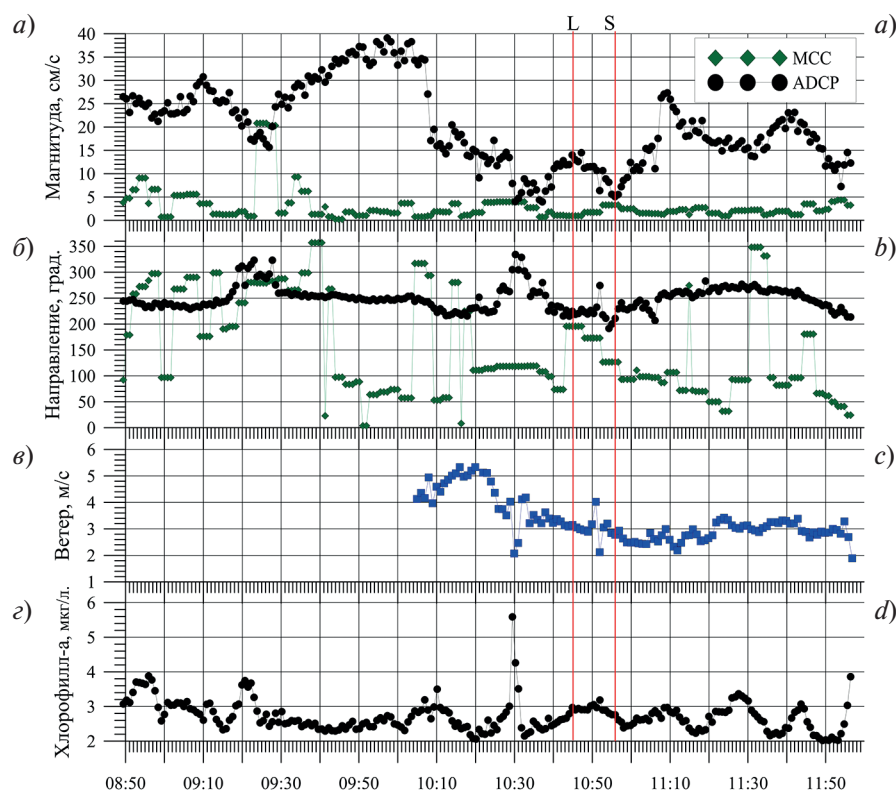


Рис. 6. Графики магнитуды (а) и направления (куда) (б) полученного течения с помощью ADCP, MCC. Графики магнитуды ветра (в), распределения хлорофилла «а» (г) вдоль трека 13.09.23

Fig. 6. Plots of magnitude (a) and direction (where) (b) of the obtained current with ADCP, MCC. Plots of wind magnitude (c), distribution of chlorophyll «a» (d) along the track 13.09.23

Время проведения измерений в наиболее узкой части водохранилища, характеризующейся высоким значением скорости руслового течения (рис. 5) (предположительно с менее зависимым от внешних факторов направлением), было близко к моменту осуществления спутниковой съемки. Однако при сравнении восстановленных течений с измеренными течениями (рис. 6) можно видеть резкие изменения направлений восстановленного по MCC течения. Магнитуда скорости по ADCP выше восстановленной скорости более чем в 3 раза.

Как показывает рис. 6, при низкой концентрации маркеров, которыми считается фитопланктон, скорость ветра не оказывает существенного влияния на возможность восстановления течений методом MCC. Помимо существенно меньшей относительно 28.07.23 концентрации хлорофилла «а», на возможность восстановления течений существенно повлиял временной интервал между спутниковыми снимками: 8 мин для 13 сентября и 25 мин для 28 июля. 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. Корреляция между данными ADCP и восстановленными MCC данными не увеличивалась, а разброс значений практически не уменьшился.

4. Заключение

Серия успешных подспутниковых экспериментов, проведенных в Куйбышевском водохранилище, раскрывает возможности и ограничения применения метода MCC для восстановления течений во внутренних эвтрофированных водоемах и ставит новые задачи перед исследователями. Эксперименты показали, что применение стандартного кросс-корреляционного алгоритма, как это обычно делается для открытых районов океанов и морей, может быть сопряжено со значительными ошибками в определении направления и величины вектора скорости течения. Тем не менее, даже стандартный подход может

давать удовлетворительные результаты в определении, по крайней мере, направления течения и его общей структуры. Как показывают данные наших первых измерений, условиями применимости стандартного МСС являются:

- присутствие маркеров течения, в данном случае фитопланктона, характеризующегося неким пороговым значением концентрации хлорофилла «а». Грубая оценка порогового значения концентрации хлорофилла «а», при которой метод МСС начинает работать, лежит в пределах 5–6 мкг/л;
- наличие мелкомасштабных (по сравнению с размером окна) неоднородностей в структуре фитопланктона на спутниковых изображениях, в том числе, неоднородностей, ориентированных поперек исследуемого потока;
- отсутствие поверхностного мата из фитопланктона, который разрушается при наличии ветра со скоростью 3 м/с и более, то есть маркеры должны быть перемешаны по глубине;
- 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 для внутренних эвтрофных водоемов это время должно превышать 20–25 минут. Однако если временной интервал будет слишком продолжительным, то методика также не будет работать, поскольку может полностью пропасть корреляция между структурами на изображениях в паре из-за значительных смещений маркеров.

Открытым остается вопрос глубины, на которой течения определяются в той или иной части акватории, поскольку оптический сканер регистрирует сигнал из слоя различной толщины в зависимости от содержания оптически активных компонентов воды. Полученные результаты указывают на существенные трудности применения стандартной методики МСС для восстановления течений во внутренних эвтрофных водоемах, что говорит о необходимости развития новых подходов к обработке спутниковых изображений. Одним из возможных путей развития является обработка изображений не по структурам, попадающим в окна стандартного размера, а, возможно, попиксельная обработка. Развитию данного подхода будет посвящена отдельная работа.

Финансирование

Алгоритмы обработки спутниковых данных и влияние гидрофизических процессов на гидрооптические характеристики анализировались при поддержке гранта РНФ № 23-17-00071, <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. Исследование особенностей течений во внутреннем водоеме с неравномерным стоком проведено в рамках темы госзадания № FFUF-2021-0006.

Funding

Algorithms for processing satellite data and the influence of hydrophysical processes on hydro-optical characteristics were analyzed with the support of the Russian Science Foundation, No. 23-17-00071, <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. A study of the characteristics of currents in an inland reservoir with irregular flow was carried out within the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (theme No. FFUF-2021-0006).

Литература

1. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
2. Chen G., Han G., Yang X. On the intrinsic shape of oceanic eddies derived from satellite altimetry // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 228. P. 75–89. doi:10.1016/j.rse.2019.04.011
3. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // Journal of Marine Systems 2016. Vol. 163. P. 80–94. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.06.006
4. Emery W.J., Thomas A., Collins M., Crawford W.R., Mackas D. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1986. Vol. 91. P. 12865–12878. doi:10.1029/JC091iC11p12865
5. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 2941–2947. doi:10.5194/tc-14-2941-2020
6. Marmorino G., Chen W. Use of WorldView-2 along-track stereo imagery to probe a Baltic Sea algal spiral // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. P. 865. doi:10.3390/rs11070865

7. Osadchiev A., Sedakov R. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 221. P. 522–533. doi:10.1016/j.rse.2018.11.043
8. Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S., Medvedeva A., Plotnikov E., Misyuk A., Verzhvskaya L. Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurement // *Ocean Dynamic*. 2021. Vol. 71. P. 655–677.
9. Danilicheva O.A., Ermakov S.A., Kapustin I.A. Retrieval of surface currents from sequential satellite radar images // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020. Vol. 17. P. 93–96. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-6-93-96
10. Shomina O., Danilicheva O., Tarasova T., Kapustin I. Manifestation of spiral structures under the action of upper ocean currents // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, N 8. P. 1871. doi:10.3390/rs14081871
11. Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещёв Г.В. Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 1. С. 242–252. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252
12. Гузиватый В.В., Науменко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 1. С. 20–30. doi:10.31857/S0205961420010042
13. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Карнацкий А.Ю. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 2. С. 131–142.
14. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Загумёнов А.А., Качур В.А. Повышение точности расчета скоростей поверхностных течений по спутниковым изображениям // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2015. № 3 (181). С. 59–66.
15. Hu Z., Pan D., He X., Song D., Huang N., Bai Y., Xu Y., Wang X., Zhang L., Gong F. Assessment of the MCC method to estimate sea surface currents in highly turbid coastal waters from GOCI // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 38, N 2. P. 572–597. doi:10.1080/01431161.2016.1268737
16. Елизаров Д.А., Князев Н.А., Лаврова О.Ю., Уваров И.А. Интеграция в спутниковую информационную систему Sea the Sea данных акустического доплеровского измерителя течений, полученных в ходе подспутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 3. С. 244–253. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253
17. Roemmich D., Argo Steering Team. Argo: The challenge of continuing 10 years of progress // *Oceanography*. 2009. Vol. 22. P. 46–55. doi:10.5670/oceanog.2009.65
18. The Sentinel Application Platform. URL: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/> (дата обращения: 10.11.2023).

References

1. Butorin N.V. Hydrological processes and water mass dynamics in the Volga cascade reservoirs. *Leningrad, Nauka*, 1969. 322 p. (in Russian).
2. Chen G., Han G., Yang X. On the intrinsic shape of oceanic eddies derived from satellite altimetry. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 228, 75–89. doi: 10.1016/j.rse.2019.04.011
3. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem. *Journal of Marine Systems*. 2016, 163, 80–94. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.06.006
4. Emery W.J., Thomas A., Collins M., Crawford W.R., Mackas D. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1986, 91, 12865–12878. doi:10.1029/JC091iC11p12865
5. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations. *Cryosphere*. 2020, 14, 2941–2947. doi:10.5194/tc-14-2941-2020
6. Marmorino G., Chen W. Use of WorldView-2 along-track stereo imagery to probe a Baltic Sea algal spiral. *Remote Sensing*. 2019, 11, 865. doi:10.3390/rs11070865
7. Osadchiev A., Sedakov R. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 221, 522–533. doi:10.1016/j.rse.2018.11.043
8. Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S., Medvedeva A., Plotnikov E., Misyuk A., Verzhvskaya L. Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurement. *Ocean Dynamic*. 2021, 71, 655–677.
9. Danilicheva O.A., Ermakov S.A., Kapustin I.A. Retrieval of surface currents from sequential satellite radar images. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 93–96. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-6-93-96

10. Shomina O., Danilicheva O., Tarasova T., Kapustin I. Manifestation of spiral structures under the action of upper ocean currents. *Remote Sensing*. 2022, 14(8), 1871. doi:10.3390/rs14081871
11. Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V. A study of the effect of hydropower operation regime on the re-distribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki Reservoir. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023, 20(1), 242–252. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252 (in Russian).
12. Guzvaty I V.V., Naumenko I M.A., Rumyantsev I V.A. Estimation of velocity of upper layer of Lake Ladoga by using of Maximum Cross Correlation (MCC) Method. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020, 1, 20–30. doi:10.31857/S0205961420010042 (in Russian).
13. Alexanin A.I., Alexanina M.G., Karnatsky A.Y. Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2013, 10 (2), 131–142 (in Russian).
14. Alexanin A.I., Alexanina M.G., Zagumjonov A.A., Kachur V.A. Improving the accuracy of calculating surface current velocities from satellite images. *Vestnik Dalnevostochnogo Otdeleniya Rossijskoj Akademii Nauk*. 2015, 3 (181), 59–66 (in Russian).
15. Hu Z., Pan D., He X., Song D., Huang N., Bai Y., Xu Y., Wang X., Zhang L., Gong F. Assessment of the MCC method to estimate sea surface currents in highly turbid coastal waters from GOCI. *International Journal of Remote Sensing*. 2017, 38(2), 572–597, doi:10.1080/01431161.2016.1268737
16. Elizarov D.A., Knyazev N.A., Lavrova O. Yu., Uvarov I.A. Integration into the See the Sea information system of acoustic Doppler current profiler data obtained concurrently with satellite data. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023, 20(3), 244–253 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253
17. Roemmich D., Argo Steering Team. Argo: The challenge of continuing 10 years of progress. *Oceanography*. 2009, 22, 46–55. doi:10.5670/oceanog.2009.65
18. The Sentinel Application Platform. URL: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/> (date of access: 10.11.2023).

Об авторах

- КАПУСТИН Иван Александрович, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593-2014, SPIN-код: 7060-5757, e-mail: kia@ipfran.ru
- МОЛЬКОВ Александр Андреевич, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0002-8550-2418, Scopus AuthorID: 55377777800, WoS ResearcherID: A-3623-2014, SPIN-код: 8959-5235, e-mail: molkov@ipfran.ru
- ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич, научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0002-6528-7589, Scopus AuthorID: 54410480500, WoS ResearcherID: D-5271-2015, SPIN-код: 1336-6994, e-mail: eav@ipfran.ru
- ДОБРОХОТОВА Дарья Васильевна, стажер-исследователь, ORCID ID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981-2022, SPIN-код: 9740-3806, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
- ДАНИЛИЧЕВА Ольга Аркадьевна, младший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0001-9529-2517, Scopus AuthorID: 57204632237, WoS ResearcherID: AAG-7486-2020, SPIN-код: 3309-3599, e-mail: olgadan@ipfran.ru
- ЛЕЩЕВ Георгий Владимирович, инженер-электрик, ORCID ID: 0000-0001-5574-7935, Scopus AuthorID: 57213165519, SPIN-код: 5370-0731, e-mail: georgeleshev@ipfran.ru