

УДК 504.455+556

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВНУТРИСУТОЧНЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© 2024 г. И. А. Капустин^{a,b,c,*}, А. А. Мольков^{a,b,c}, О. А. Даниличева^{a,b}, О. В. Шомина^{a,b},
Г. В. Лещев^{a,b}, Д. В. Доброхотова^{a,b}, А. В. Ермошкин^{a,b}

^aИнститут прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН,
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия

^bНижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
проспект Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022, Россия

^cВолжский государственный университет водного транспорта, Нестерова, 5, Нижний Новгород, 603950, Россия

*e-mail: kia@ipfran.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Восстановление поля течений дистанционными методами — традиционная задача океанологии. Для ее решения применительно к водным объектам с большими пространственными размерами (открытые районы морей и океанов) регулярно применяются спутниковые инструменты: альтиметры, доплеровские радары, оптические сенсоры. Последние хорошо работают для водоемов со значительными температурными градиентами вод при применении метода обработки последовательных спутниковых изображений с различной временной задержкой. Реже в качестве маркеров для поиска соответствий в изображениях и оценке смещений используются области интенсивного цветения фитопланктона, которые являются неотъемлемой частью множества небольших эвтрофных водоемов. Мониторинг таких водоемов возможен спутниковыми сканерами цвета, обеспечивающими высокое пространственное разрешение. Целью настоящей работы являлось исследование возможности восстановления поля течений в Горьковском водохранилище, как примера эвтрофного водоема среднего размера, по последовательным снимкам двух различных сканеров цвета высокого разрешения с небольшой временной задержкой между снимками. В работе приведено описание подспутникового судового эксперимента и представлены результаты восстановления поля течений методом максимальных корреляций по спутниковым изображениям в сравнении с судовыми данными. Показано, что предложенный метод имеет перспективы развития.

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

DOI: 10.31857/S0002351524030071 EDN: JHTNEJ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование течений в заданном районе Мирового океана — традиционная задача современной океанологии. В настоящее время для решения таких задач используются данные судовых измерений акустическими доплеровскими профилографами течений (Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)), а также данные с дрейфующих буев. Для определения течений в прибрежной зоне, эффективным инструментом являются доплеровские радиолокаторы коротковолнового и сверхвысокочастотного диапазонов [см. обзор Amani et al., 2022]. Вместе с тем полезную информацию

о динамике верхнего слоя крупномасштабных акваторий несут спутниковые данные. Наиболее распространенным дистанционным методом измерения морских течений с масштабами в десятки и сотни километров является спутниковая альтиметрия [Chen et al., 2019; Early et al., 2011; Chelton et al., 2011]. Скорости приповерхностных струйных течений, океанических фронтов и мезомасштабных вихрей восстанавливаются на основе геострофической аппроксимации [Kubryakov et al., 2016] с точностью порядка см/с на масштабах десятков км [Лебедев и Костяной, 2005; Raj et al., 2016]. Однако эффективность альтиметрических

методов географически ограничена, так как в экваториальной полосе геострофическое допущение неверно [Rio and Santoleri, 2018]. Также развиваются доплеровские спутниковые методы определения скорости течения [Chapron et al., 2005]. Другой способ восстановления течений в верхнем слое океана основан на анализе смещения неоднородностей на нескольких последовательных спутниковых (или авиационных) оптических или радиолокационных изображениях водной поверхности. Наибольшее распространение получили два метода: метод максимальной взаимной корреляции (Maximum Cross Correlation (MCC)) [Emery et al., 1986; Emery et al., 1992; Dransfeld et al., 2006; Gade et al., 2012; Kozlov et al., 2020; Marmorino et al., 2018; Notarstefano et al., 2008; Castellanos et al., 2013] и метод оптического потока (Optical Flow Method) [Chen et al., 2011; Osadchiv and Sedakov, 2019; Aleskerova et al., 2021; Sun et al., 2016]. В первом методе определяется сходство между двумя последовательными парами изображений на основе коэффициентов взаимной корреляции, во втором используются сведения о пикселях с равной яркостью в рассматриваемой серии изображений и определяется их смещение. Считается, что метод оптического потока более надежен и дает более высокое пространственное разрешение, чем метод максимальной взаимной корреляции [Sun et al., 2016], особенно для смещений порядка 1 пикселя или меньше. Однако

при больших смещениях элементов между кадрами оба метода хорошо согласуются [Delandmete et al., 2017; Liu et al., 2015; Yang and Johnson, 2017]. Основными маркерами на поверхности воды для применения рассмотренных методов являются лед [Kozlov et al., 2020], температура воды и ее градиенты [Emery et al., 1986; Emery et al., 1992; Chen et al., 2011; Bowen et al., 2002], области пониженного контраста, например, в пленочных снимках на радиолокационных изображениях [Qazi et al., 2014; Marmorino et al., 2010; Danilicheva et al., 2020] или контрастные области интенсивного цветения фитопланктона [Aleskerova et al., 2021; Marmorino and Chen, 2019]. Последние часто очерчивают вихревые структуры течений. Наш предшествующий опыт их оценки по спиралевидным проявлениям фитопланктона в Балтийском море [Shomina et al., 2022] на основе двух изображений высокого разрешения Sentinel-2/MSI и Landsat-8/OLI, полученных с разницей в 17 минут, показал, что метод максимальной взаимной корреляции эффективен и характеризуется более простыми расчетами и временем счета, что согласуется с результатами других исследовательских групп см., например, [Hamze-Ziabari et al., 2022] и цитируемую там литературу.

В целом, использование спутниковых данных и рассмотренных методов обычно относится к оценке динамических параметров крупномасштабных процессов с большим временем жизни,

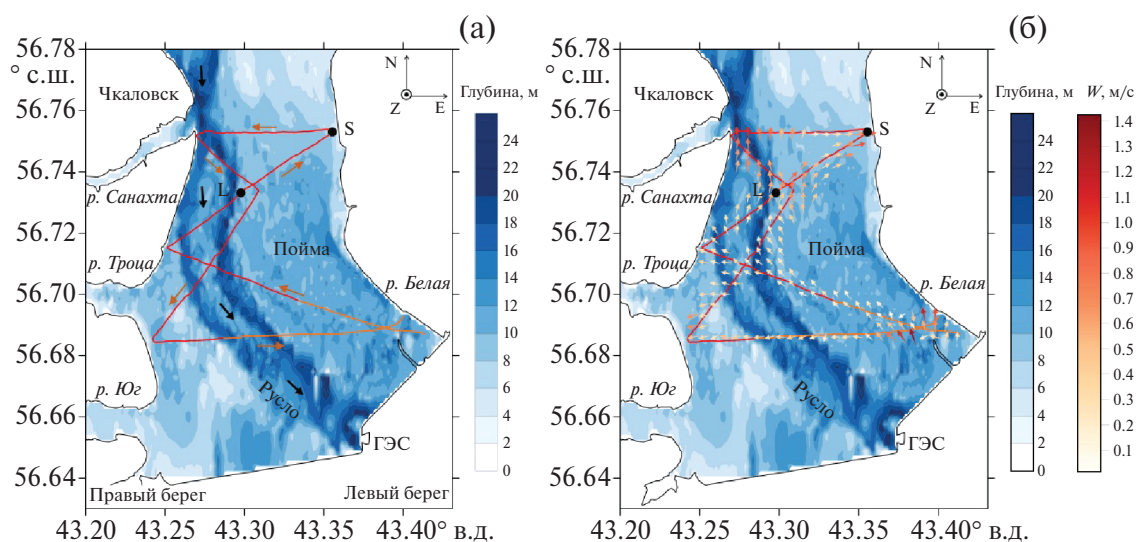


Рис. 1. Карта глубин южной части Горьковского водохранилища с наложенным треком судна (а) и поле приводного ветра над акваторией водохранилища в момент проведения измерений на высоте 7 метров (б). Выделенная красным часть трека соответствует времени максимального суточного расхода через ГЭС, оранжевым цветом обозначены моменты увеличения и уменьшения суточного расхода. Оранжевыми стрелками отмечено направление движения судна. Точкой и буквами L и S отмечены моменты спутниковой съемки в привязке к судовым измерениям. Черные стрелки показывают направление течения русла.

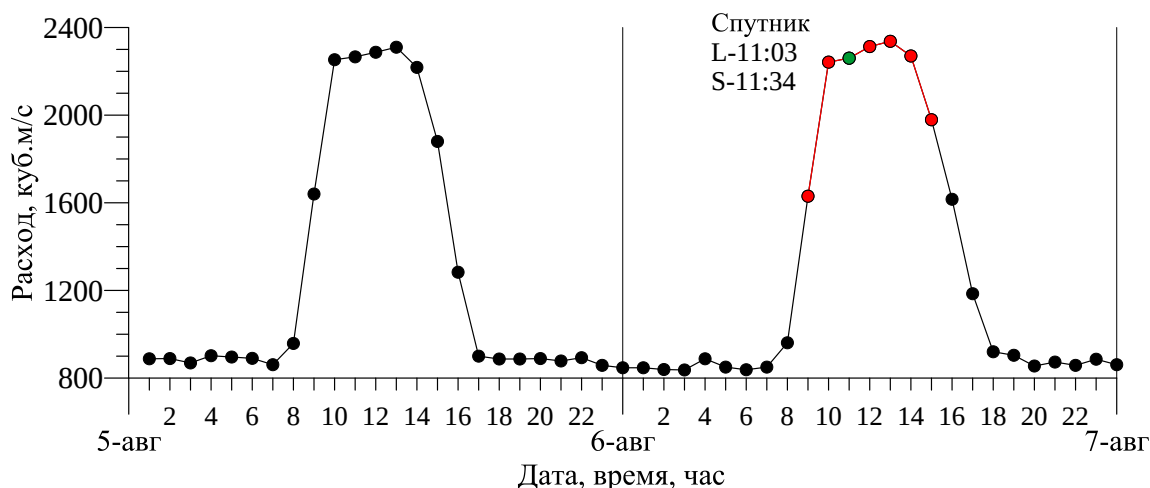


Рис. 2. Графики внутрисуточного расхода воды через ГЭС 05.08.2022 (день предшествующий измерениям) и 06.08.2022. Красными точками обозначен период проведения измерений, зеленая точка — момент пролета спутника с точностью до часа.

то есть к оценке параметров открытых районов морей и океанов. Помимо постоянного интереса именно к глобальным процессам, это связано еще и с тем, что регулярность съемки одного и того же объекта выше для сканеров среднего и низкого разрешений. Благодаря этому, например, в [Гузиватый и др., 2020] была продемонстрирована возможность использования данных низкого разрешения MODIS и MCC метода к внутренним водоемам, а именно к одному из самых крупных озер — Ладожскому.

Действительно, внутренние водоемы сегодня тоже требуют значительного внимания. Литературные данные о структуре течений, например, на водохранилищах, полученные в прошлом веке на основе измерений с помощью вертушек на гидрологических постах и плавучих самописцев, корректно описывают современную структуру течений лишь в общем. Изменившиеся за десятилетия рельеф дна и уровень воды, а также переменный объем сброса воды через ГЭС, формируют значительную изменчивость течений, особенно в приплотинном участке. Эти вариации были продемонстрированы на примере Горьковского водохранилища в работах [Доброхотова и др., 2023; Капустин и др., 2019, 2021a, 2021b] на основе продолжительных судовых измерений и анализа спутниковых изображений. Особенно важным оказался результат, указывающий на то, что ежесуточный пик сброса воды около полудня проявляется в изменении структуры течений (в том числе формирования круговоротов и обратных течений) на масштабах порядка нескольких ча-

сов. В этих условиях быстрой временной и относительно мелкомасштабной пространственной изменчивости, продолжительные судовые измерения скорости течений на разрезах водохранилища не позволяют корректно разделить регулярную пространственную структуру течения и его вариации, вызванные как работой ГЭС, так и ветровым форсингом.

В этой связи, восстановление “мгновенной” пространственной карты течений по последовательным спутниковым снимкам небольшого внутреннего водоема представляется привлекательным и перспективным подходом. Исследованию его возможностей посвящена настоящая работа. В работе представлено описание подспутникового эксперимента на Горьковском водохранилище, включающего измерения профилей течений с помощью судового ADCP, параметров ветра ультразвуковым анемометром и распределения фитопланктона с помощью погружного зонда синхронно с последовательной съемкой сканерами высокого разрешения Sentinel-2A/MSI и Landsat-9/OLI с интервалом 30 минут. В работе также продемонстрированы результаты восстановления течений с использованием разных спектральных каналов и проведена верификация полученных результатов данными судовых измерений.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Для лета 2022 были заранее определены 7 дат с двукратной спутниковой съемкой всеми доступными сканерами высокого разрешения. Однако в силу неподходящих погодных условий подспут-

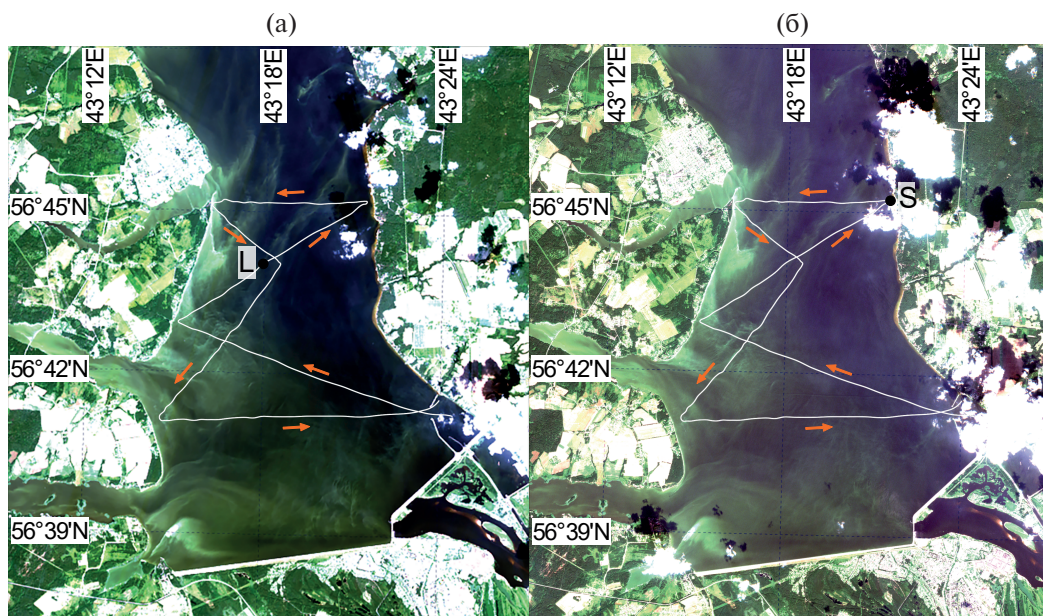


Рис. 3. Композитные RGB-изображения Landsat-9/OLI (11:04) (L) (a) и Sentinel-2A/MSI (11:34) (S) (б) Горьковского водохранилища от 06.08.22 с наложенным треком судна. Стрелками отмечено направление движения судна.

никовые судовые измерения были реализованы только для 3 дат, а успешными они оказались только для одного дня — 6 августа 2022 г. Измерения были проведены в условиях ясной штилевой погоды в период с 09:18 по 14:54 по местному времени в южной части водохранилища на удалении до 10 км от ГЭС. В ходе измерений регистрировались скорость и направление течения с помощью акустического доплеровского профилографа течений ADCP WorkHorse 1200 kHz, скорость и направление ветра с помощью ультразвукового анемометра Windsonic и пространственное распределение концентрации хлорофилла «а» с помощью STD-зонда YSI EXO 3, жестко зафиксированного у борта на глубине 0.5 м. Скорость движения судна составляла до 10 км/ч, что обеспечивало корректную работу погруженных в воду датчиков. Маршрут судна охватывал русловую и пойменную части и состоял из поперечных разрезов озерной части водохранилища. В ходе измерений маршрут корректировался с целью пересечения большего числа вариаций концентрации водорослей. Маршрут движения судна, нанесенный на батиметрию водохранилища, и поле приводного ветра за время судовых работ, представлены на рис. 1. Видно, что скорость ветра по данным измерений анемометром была на уровне 1 м/с, то есть ниже порога генерации ветровой ряби. В предшествующие дни (4 и 5 августа 2022) на акватории водохранилища также наблюдалась штилевая погода, с порывами ветра не превышающими 3 м/с,

согласно архиву данных Волжской ГМО. Поэтому влияние ветрового форсинга на течения было минимальным. На рис. 2. приведены зависимости внутрисуточного расхода воды через ГЭС за 5 августа (день предшествующий измерениям) и за 6 августа. Красными точками обозначен период проведения измерений, зеленой точкой — моменты спутниковой съемки с точностью до часа. Видно, что период проведения измерений пришелся на дневное увеличение сброса через ГЭС, типичное для начала августа, а спутниковая съемка происходила в моменты максимального сброса воды. Течения при этом значительно возрастают как в русловой части, так и в пойменной и, согласно нашим многолетним измерениям, вектора скорости разворачиваются в сторону ГЭС [Доброхотова и др., 2023]. При приблизительно постоянном увеличенном сбросе в ходе проведения измерений, течения в толще воды (начиная с 1–1.5 м), согласно данным ADCP, были относительно стационарными, в то время как течения в верхнем слое значительно менялись (будет показано ниже).

Одновременно с подспутниковыми судовыми измерениями сканеры высокого разрешения Landsat-9/OLI и Sentinel-2A/MSI осуществили съемку исследуемого района водохранилища с интервалом в 30 минут, а именно в 11:04 и в 11:34 по местному времени соответственно. Композитные RGB-изображения с наложенным треком судна представлены на рис. 3. Стрелками отмечено на-

Таблица 1. Характеристики спектральных каналов сканеров цвета Landsat-9/OLI и Sentinel-2/MSI

Landsat-9/OLI		Sentinel-2/MSI	
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

правление движения судна. Буквами L и S отмечены моменты спутниковой съемки сканерами Landsat-9/OLI и Sentinel-2A/MSI соответственно в привязке к судовым измерениям. Видно, что в день проведения измерений наблюдалось сильно неоднородное пространственное распределение фитопланктона разных масштабов и форм, включая области с резкими контрастными границами. С одной стороны, подобные структуры необходимы при использовании алгоритмов поиска общих элементов в паре изображений. С другой стороны, наличие фитопланктона в приповерхностном слое нарушает приближение “черной воды”, необходимое для использования инфракрасных (ИК) каналов при восстановлении температуры воды или проведения атмосферной коррекции спутниковых снимков [Molkov et. al., 2022]. По этим причинам в качестве маркеров для применения МСС-метода был использован именно фитопланктон. В настоящей работе мы пренебрегали вертикальным смещением фитопланктона на масштабах 30 минут [Алеев, 1991; Stal, 2012] и, кроме того, считали глубину зондируемого слоя воды каждым из сканеров примерно одинаковой, поскольку спектральные каналы обоих спутников, как видно из табл. 1, достаточно близки. В конечном счете, это позволяло считать, что изменение яркости пикселя в паре изображений определяется только горизонтальным смещением фитопланктона под действием течений.

Для восстановления поля поверхностных течений МСС методом были взяты спутниковые снимки 1-го уровня обработки, т.е. без атмосферной коррекции. Эти изображения, отличавшиеся полем зрения, геометрией съемки и пространственным разрешением (30 м для Landsat-9/OLI и 10 м для Sentinel-2/MSI), были сведены с помощью платформы для обработки спутниковых данных SNAP (The Sentinel Application Platform [https://step.esa.int/main/download/snap-download/]) к геопривязанным изображениям района измерений с единым пространственным разрешением в 30 м.

Далее изображения разбивались на окна размером 16×16 пикселей (480×480 м) и осуществлялся поиск наилучшего соответствия между двумя последовательными окнами посредством вычисления корреляционной матрицы. Размер окна был подобран исходя из оценок максимального смещения неоднородностей на полных изображениях и потребности в лучшем разрешении восстановленного поля скоростей. Согласно оценкам, максимальная скорость смещения наблюдалась при анализе изображений, полученных в ближнем инфракрасном диапазоне, и достигала порядка 19 см/с, что соответствует смещению ~ 350 м за интервал между двумя кадрами. Для корректного восстановления скоростей размер окна должен быть больше максимального смещения неоднородностей, однако, для получения поля течений с наилучшим разрешением существует необходимость в использовании окна расчёта минимально возможного размера, что остановило нас на выборе окна 16×16 пикселей. Соседние окна перекрывали друг друга на 50% в горизонтальном или вертикальном направлении. Такое перекрытие осуществлялось для учёта дополнительной информации о смещениях на границах и углах каждого окна. По положению максимума корреляционной матрицы рассчитывалось направление смещения неоднородностей и, используя информацию о временном интервале между последовательными кадрами, восстанавливался вектор скорости течения в окне. Вектора, полученные с корреляционным коэффициентом ниже 0.5, отсеивались. Таким образом формировалось усредненное поле векторов, отождествляемое с горизонтальным смещением поверхностного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановленные поля течений по смещению областей интенсивного цветения фитопланктона на двух последовательных спутниковых оптических изображениях Горьковского водохранилища представлены на рис. 4. Результаты получены для четырех каналов: синий (каналы 2), зеленый (ка-

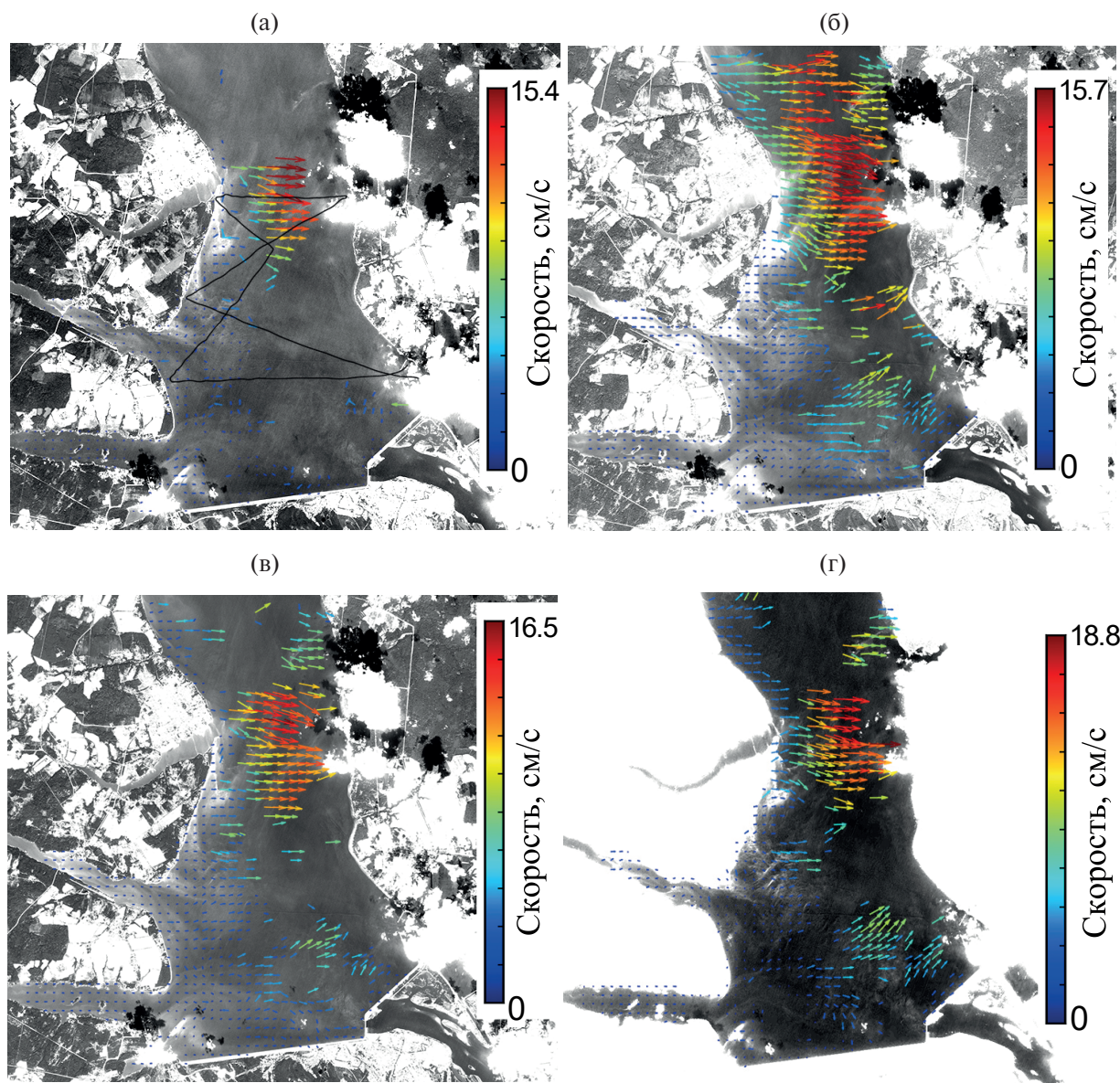


Рис. 4. Восстановленные по спутниковым изображениям поля течений на Горьковском водохранилище 6 августа 2022 г.: синий канал с наложенным треком судна (а), зеленый канал (б), красный канал (в) и ближний ИК канал (г).

налы 3), красный (каналы 4) и ближний ИК (каналы 5 и 8А).

Согласно рис. 4 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. Глубина фотической зоны по данным предшествующих измерений [Мольков и др., 2019] не превышает 2.5 м. Реальная же глубина видности со спутника

еще меньше и близка к глубине измерений скорости течений (не более 1 м при условии чистой воды с минимальной концентрацией фитопланктона).

Направление течения в приповерхностном слое оказалось примерно одинаковым для всех спектральных каналов и ориентированным поперек водохранилища и основного руслового течения Волги практически во всем районе работ, кроме юго-восточной стороны (“нижний правый угол”), где течение имеет обратное направление. На первый взгляд полученный результат может показаться неожиданным, но он имеет объяснение. Обратимся к рис. 5, где представлены поля течений, полученные методом МСС для зелено-

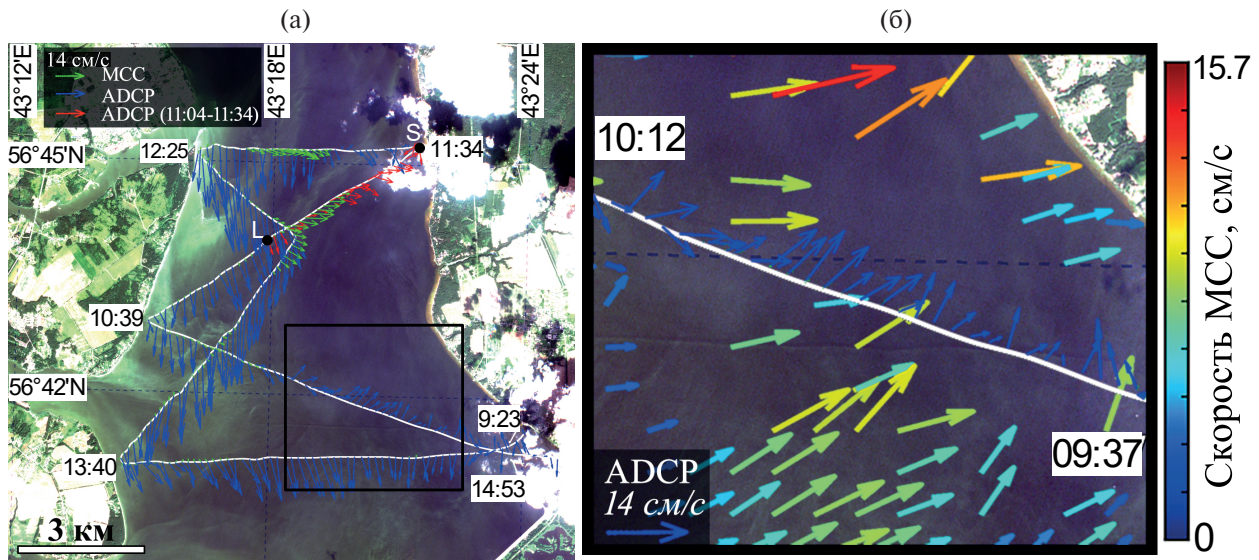


Рис. 5. Сравнение результатов ADCP-измерений течений на глубине 0,8 м и результата обработки спутниковых изображений в зеленом канале вдоль трека судна. ADCP — синие вектора, красные вектора — между пролетами спутников (11:04–11:34), зелёные вектора — по методу MCC (а). Увеличенная юго-восточная часть акватории с близкими по времени и пространству к спутниковой съемке ADCP-измерениями (б).

го канала (зеленые вектора) и с помощью ADCP в ходе судовых измерений (синие вектора). Красным цветом выделен участок ADCP-измерений между спутниковыми съемками. Видно, что на участке LS направления течений, а также магнитуды, полученные двумя методами, близки. Детальное сравнение векторов течений, полученных разными методами с учетом ветрового вклада 3% скорости ветра [Karustin et al., 2019] дает еще некоторое улучшение соответствия данных ADCP и MCC (рис. 6). При этом для других участков тре-

ка учет ветрового вклада не дает ощутимого улучшения соответствия данных ADCP и MCC.

Кроме рассмотренного участка, есть неплохое соответствие течений в области измерений, проводимых в период с 9:37 до 10:12 (рис. 5б) в юго-восточной части акватории (здесь следует учесть, что сравниваются разнесенные по времени пространству данные). Оба этих участка находятся над поймой и характеризуются слабым течением в условиях “фоновых” сбросов воды через ГЭС и в отсутствии ветра, а в день измерений и относительно низкой концентрацией фитопланктона. Глубина видимости диска Секки (Z_{sd}) в этом районе варьировалась в пределах 1.5–2.0 м, водоросли были распределены квазиоднородно по верхнему слою, приповерхностные скопления фитопланктона отсутствовали. Одновременно с этим, у правого берега Волги (левая сторона изображения на рис. 4–5) наблюдалась обратная ситуация, а именно зоны интенсивного приповерхностного цветения ($Z_{sd} \sim 0.2–0.7$ м) вплоть до сплошного зеленого “ковра”. Это наблюдение, с одной стороны, указывает на переменную толщину водного слоя, из которой спутник принимает сигнал, а, с другой стороны, на принципиальную разницу в слоях, для которых восстановлены течения, поскольку ADCP измеряет течения с глубины порядка 0.8 м и ниже, что является одной из причин существенного различия в структуре и скоростях течений в тонком поверхностном слое и в толще воды.

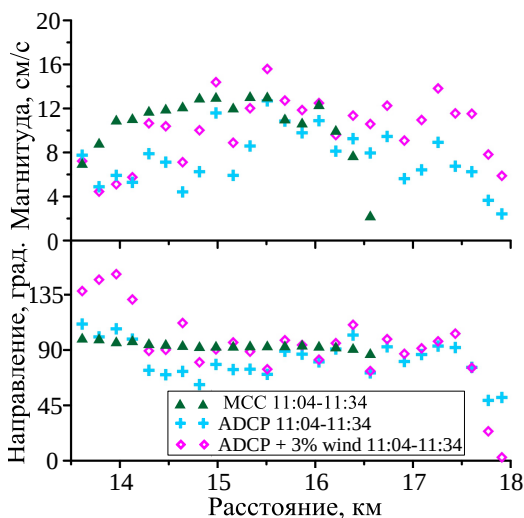


Рис. 6. Графики магнитуды и направления (куда) полученного течения с помощью ADCP, MCC и векторная сумма для данных ADCP с 3% ветрового вклада для участка LS.

Другая возможная причина расхождения в направлении течений, определенных двумя методами, заключается в том, что поверхностный слой в штилевую погоду характеризуется высокой концентрацией водорослей, которые способствуют поглощению солнечного излучения и могут приводить к дополнительному нагреву тонкого приповерхностного слоя воды. При наличии на поверхности воды тонкого перегретого слоя в несколько сантиметров может сформироваться устойчивая вертикальная температурная стратификация, препятствующая вертикальной конвекции. Оценки числа Ричардсона (Ri) для условий эксперимента при перегреве тонкого поверхностного слоя ΔT порядка 10 градусов и скорости движения слоя порядка 10 см/с и при толщине слоя более 1 см дают значения $Ri > 1$, что указывает на преобладание сил плавучести и устойчивость стратификации в условиях эксперимента. При этом оценки числа Рейнольдса (Re) для тонкого верхнего слоя в несколько см в условиях эксперимента порядка 1000, что характеризует его течение слоя как квазиламинарное. Представленные качественные оценки указывают на возможность реализации такого режима, при котором тонкий верхний слой водохранилища оказывается сильно-стратифицированным и не чувствующим подповерхностного (руслового) потока, что объясняет расхождения в скоростях, полученных с помощью ADCP и МСС. Следует отметить, что в силу малой толщины перегретого слоя, такая стратификация будет быстро разрушаться при наличии даже слабого поверхностного волнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продуктивные воды небольших и неглубоких внутренних водоемов, подобных Горьковскому водохранилищу, как правило хорошо и квазигоризонтально прогреты. Для них горизонтальные температурные градиенты могут быть незначительны, что мешает использованию МСС метода на основе температурных градиентов. Имеющиеся в литературе результаты для крупномасштабных областей цветения, например, в Балтийском море (десятки и сотни километров), тоже в какой-то мере отдалены от аналогичных работ на небольшом и динамичном водоеме с регулируемым стоком. В настоящей работе представлены результаты первой попытки восстановления поля течений в Горьковском водохранилище по смещению фитопланктона по последовательным изображениям двух различных

космических сканеров цвета высокого разрешения Landsat-9/OLI и Sentinel-2/MSI. В ходе подспутникового эксперимента полученные результаты были валидированы данными ADCP и, в отдельных частях акватории, было получено хорошее согласие между прямыми измерениями течений и восстановленными по данным МСС. В частности, хорошее согласие получено на участках с относительно низкой концентрацией фитопланктона, квазиравномерно распределенного по глубине, слабым речным течением и характерными значениями видимости диска Секки порядка и более верхнего горизонта измерений ADCP (0.8 м). На участках, где наблюдается несоответствие данных, были проанализированы возможные причины этого расхождения. В частности, расхождения наблюдаются в условиях интенсивного поверхностного цветения, при глубине видимости диска Секки 0.2–0.7 м или наличия на поверхности сплошного «ковра» из фитопланктона. Это указывает на то, что метод МСС определяет течения на различных горизонтах по глубине в разных частях акватории. Как показывают оценки, сильно неоднородное приповерхностное цветение в штиль может способствовать перегреву тонкого верхнего слоя и формированию его устойчивой вертикальной стратификации, препятствующей вертикальной конвекции. В таком случае тонкий верхний перегретый слой водоема может двигаться в соответствии с закономерностями, отличными от основного руслового потока и, вероятно, практически не взаимодействовать с ним в отсутствие волнения.

Представленные в работе результаты оригинальны и новы, они дают надежду на применимость метода МСС для небольших эвтрофных водоемов, и в то же время указывают на слабые стороны, требующие особого внимания при выполнении дальнейших исследований. Обнаруженный в ходе эксперимента эффект, который связан с присутствием поверхностного слоя с высокой концентрацией фитопланктона, подчиняющегося отличной от основной водной массы динамике, может быть крайне важным для ряда задач дистанционного зондирования и экологических приложений.

Дальнейшие исследования, в частности, будут направлены на:

— экспериментальное подтверждение существования тонкого перегретого слоя, выявление условий его существования, исследование его динамики;

– развитие и модернизацию метода МСС для внутренних эвтрофных водоемов по результатам серии успешных подспутниковых экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ 18–77–10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>. Влияние режима работы ГЭС на структуру течений анализировалось в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» ННГУ (№ темы Н-468–99_2021–2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алеев М. Ю. Биоконвекция у морских планктонных водорослей // Экология моря. 1991. Т. 38. С. 99–107.
- 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.
- 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.
- Капустин И. А., Вострякова Д. В., Мольков А. А., Даниличева О. А., Лещев Г. В., Ермаков С. А. (2021a) Натурные подспутниковые наблюдения конвергентных течений в приповерхностном слое воды по их пенным образам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 188–196.
- Капустин И. А., Ермаков С. А., Смирнова М. В., Вострякова Д. В., Мольков А. А., Чебан Е. Ю., Лещёв Г. В. (2021b) О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в Горьковском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 214–221.
- Капустин И. А., Мольков А. А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 110–117.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного ин-та океана, 2005. 366 с.
- Мольков А. А., Корчёмкина Е. Н., Лещев Г. В., Даниличева О. А., Капустин И. А. О влиянии цианобактерий, волнения и дна на коэффициент яркости воды Горьковского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 203–212.
- Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S., Medvedeva A., Plotnikov E., Mizyuk A., Verzhvetskaia L. Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurement // Ocean Dyn. 2021. V. 71. P. 655–677.
- Amani M., Moghimi A., Mirmazloumi S. M., Ranjgar B., Ghorbanian A., Ojaghi S., Ebrahimi H., Naboureh A., Nazari M. E., Mahdavi S., Moghaddam S. H. A., Asiyabi R. M., Ahmadi S. A., Mehravar S., Mohseni F., Jin S. Ocean Remote Sensing Techniques and Applications: A Review (Part I) // Water. 2022. V. 14. № 22. P. 3400.
- Bowen M. M., Emery W. J., Wilkin J. L., Tildesley P. C., Barton I. J., Knewton R. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19. P. 1665–1676.
- Castellanos P., Pelegrí J. L., Baldwin D., Emery W. J., Hernández-Guerra A. Winter and spring surface velocity fields in the Cape Blanc region as deduced with the maximum cross-correlation technique // Int. J. Remote Sens. 2013. V. 34. P. 3587–3606.
- Chapron B., Collard F., Ardhuin F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. V. 110. № C7.
- Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. V. 91. № 2. P. 167–216.
- Chen G., Han G., Yang X. On the intrinsic shape of oceanic eddies derived from satellite altimetry // Remote Sens. Environ. 2019. V. 228. P. 75–89.
- Chen W. Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence // J. Geophys. Res. Ocean. 2011. V. 116. P. C06015.
- Danilicheva O. A., Ermakov S. A., Kapustin I. A. Retrieval of surface currents from sequential satellite radar images // Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosm. 2020. V. 17. P. 93–96.
- Delandmeter P., Lambrechts J., Marmorino G. O., Legat V., Wolanski E., Remacle J.-F., Chen W., Deleersnijder E. Submesoscale tidal eddies in the wake of coral islands and reefs: Satellite data and numerical modelling // Ocean Dyn. 2017. V. 67. P. 897–913.
- Dransfeld S., Larnicol G., Le Traon P. Y. The potential of the maximum cross-correlation technique to estimate surface currents from thermal AVHRR global area coverage data // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2006. V. 3. P. 508–511.
- Early J. J., Samelson R. M., Chelton D. B. The evolution and propagation of quasigeostrophic ocean eddies // J. Phys. Oceanogr. 2011. V. 41. № 8. P. 1535–1555.
- 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 // J. Geophys. Res. Ocean. 1986. V. 91. P. 12865–12878.
- Emery, W. Fowler C., Clayson C. Satellite-image-derived Gulf Stream currents compared with numerical model results // J. Atmos. Ocean. Technol. 1992. V. 9. P. 286–304.
- Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // Int. J. Remote Sens. 2012. V. 33. P. 3122–3146.
- Hamze-Ziabari S. M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D. A. Monitoring Mesoscale to Submesoscale

- Processes in Large Lakes with Sentinel-1 SAR Imagery: The Case of Lake Geneva // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 19. P. 4967.
- Kapustin I. A., Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Bogatov N. A., Kupaev A. V., Molkov A. A., Ermakov S. A. On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks // *Remote Sens*. 2019. V. 11. P. 840.
- 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. V. 14. P. 2941–2947.
- 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 // *J. Mar. Syst.* 2016. V. 163. P. 80–94.
- Liu T., Merat A., Makhmalbaf M., Fajardo C., Merati P. Comparison between optical flow and cross-correlation methods for extraction of velocity fields from particle images // *Exp. Fluids*. 2015. V. 56. P. 166.
- Marmorino G., Chen W. Use of WorldView-2 along-track stereo imagery to probe a Baltic Sea algal spiral // *Remote Sens*. 2019. V. 11. P. 865.
- Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A. Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2010. V. 115. P. C05010.
- Marmorino G. O., Smith G. B., North R. P., Baschek B. Application of airborne infrared remote sensing to the study of ocean submesoscale eddies // *Front. Mech. Eng.* 2018. V. 4. P. 10.
- Molkov A., Fedorov S., Pelevin V. Toward Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-3/OLCI Images of Productive Waters // *Remote Sens*. 2022. V. 14. P. 3663.
- Notarstefano G., Poulain P. M., Mauri E. Estimation of surface currents in the Adriatic Sea from sequential infrared satellite images // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2008. V. 25. P. 271–285.
- Osadchiv 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 Sens. Environ.* 2019. V. 221. P. 522–533.
- Qazi W. A., Emery W. J., Fox-Kemper B. Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential SAR images // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2014. V. 52. P. 7559–7580.
- Raj R. P., Johannessen J. A., Eldevik T., Nilsen J. Ø., Halo I. Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2016. V. 121. P. 4503–4521.
- Rio M. H., Santoleri R. Improved global surface currents from the merging of altimetry and sea surface temperature data. *Remote Sens. Environ.* 2018. V. 216. P. 770–785.
- Shomina O., Danilicheva O., Tarasova T., Kapustin I. Manifestation of Spiral Structures under the Action of Upper Ocean Currents // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 8. P. 1871.
- Stal L. J. Cyanobacterial mats and stromatolites // *Ecology of Cyanobacteria II*. 2012. P. 65–125.
- Sun H., Song Q., Shao R., Schlicke T. Estimation of sea surface currents based on ocean colour remote-sensing image analysis // *Int. J. Remote Sens.* 2016. V. 37. P. 5105–5121.
- Yang Z., Johnson M. Hybrid particle image velocimetry with the combination of cross-correlation and optical flow method // *J. Vis.* 2017. V. 20. P. 625–638.

DETERMINING CURRENTS IN THE RESERVOIR BY CONSEQUENT SUB-DAILY SATELLITE IMAGES

I. A. Kapustin^{1,2,3,*}, A. A. Molkov^{1,2,3}, O. A. Danilicheva^{1,2}, O. V. Shomina^{1,2}, G. V. Leshchev^{1,2}, D. V. Dobrokhotova^{1,2}, A. V. Ermoshkin^{1,2}

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

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

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

*e-mail: kia@ipfran.ru

Reconstructing the field of currents using remote sensing methods is a traditional task of oceanology. Satellite instruments such as altimeters, Doppler radars, and optical sensors are routinely used to solve oceanological problems for waters with large dimensions (open areas of the seas and oceans). The latter work well for reservoirs with significant water temperature gradients when applying the method of processing successive satellite images with varying time delays. Less commonly, areas of intense phytoplankton blooms, which are usual for productive waters, are used as markers for image matching. Such waters can be monitored with satellite ocean color sensors that provide high spatial resolution. The goal of the present paper was to investigate the possibility of reconstructing the flow field in the Gorki Reservoir, as an example of a medium-sized eutrophic reservoir, from sequent images of two different high-resolution ocean color sensors with a short time delay between images. This paper describes the field experiment under the satellite overpasses and presents the results of applying the maximum correlation method to two satellite images for retrieval of the current field in comparison with shipboard data. It is shown that the proposed method has prospects for development.

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