

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОЙ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИИ

© 2020 г. В. В. Гузиватый^а *, М. А. Науменко^а, В. А. Румянцев^а

^аИнститут озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: guzivaty@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2019 г.

Первое применение метода максимальной кросс-корреляции для расчета поверхностных течений Ладожского озера показало его перспективность в условиях практического отсутствия прямых измерений. Метод адаптирован для крупного озера и предложены новые процедуры выбора и анализа наиболее информативных космических инфракрасных съемок для анализа течений. Выявлены наиболее благоприятные условия, параметры, а также ограничения для применения метода максимальной кросс-корреляции для Ладожского озера. Построены системы поверхностных течений для определенных ветровых ситуаций для периода открытой воды. Разработанная методика на основе анализа последовательных спутниковых ИК съемок позволяет оценить динамику вод Ладожского озера и может быть применена для других крупных озер.

Ключевые слова: течения на поверхности крупного озера, метод максимальной кросс-корреляции, Ладожское озеро

DOI: 10.31857/S0205961420010042

ВВЕДЕНИЕ

Течения в крупных озерах определяют процессы тепло-массопереноса различных пространственно-временных масштабов, распределение химических элементов и гидробионтов, а также во многом ответственны за трансформацию и механизмы самоочищения вод. Непосредственные измерения течений в водоемах связаны со значительными затратами и требуют существенных ресурсов.

Во второй половине двадцатого века Институтом озероведения РАН были предприняты попытки проведения измерений с заякоренных судов и буйковых станций и результаты их остаются до сих пор самыми массовыми измерениями течений в Ладожском озере (Малинина и др., 1984). В настоящее время синоптическая и мезомасштабная циркуляция вод крупнейшего в Европе Ладожского озера недостаточно изучена из-за отсутствия регулярных гидрологических работ. Лишь долговременные измерения течений позволят представить крупномасштабную циркуляцию в озере и дать количественную оценку системы течений, меняющейся в зависимости от сезона и ветровой ситуации. Непосредственные измерения являются необходимым звеном для верификации различных моделей, в частности, двух- и трехмерных термогидродинамических моделей крупных озер (Охлопкова, 1966; Андреев,

Воробьева, 1986; Астраханцев и др., 1988; Филатов, 1991).

Одним из перспективных методов оценки системы поверхностных течений в таком крупном озере как Ладожское, является метод максимальной кросс-корреляции (Maximum Cross Correlation, далее МСС), использующий последовательные ИК спутниковые снимки с интервалом в несколько часов.

Появление космических аппаратов, сканирующих поверхность Земли несколько раз в сутки, привело к идее проследить движение воды по последовательным спутниковым снимкам. Впервые методика была предложена в 1986 году В. Эмери (Emery et al., 1986) для анализа течений на поверхности морей и океанов. Метод разработан для обнаружения поверхностных потоков, связанных с видимыми движениями температурных градиентов. Он получил достаточно широкое распространение для океанов и морей (Kelly et al., 1992). Спутниковые методы способны дать информацию о полях скоростей и волнения в масштабе акватории с разрешением по времени в несколько часов и по пространству порядка километра (Бондур, Мурынин, 2015; Иванов и др., 1999; Лаврова, Митягина, 2016). Их использование позволяет изучать обширные районы, затрачивая минимальные ресурсы (Алексанин и др., 2013). В нашей стране имеются единичные публикации по исследованиям методом МСС (Afanasyev et al., 2002;

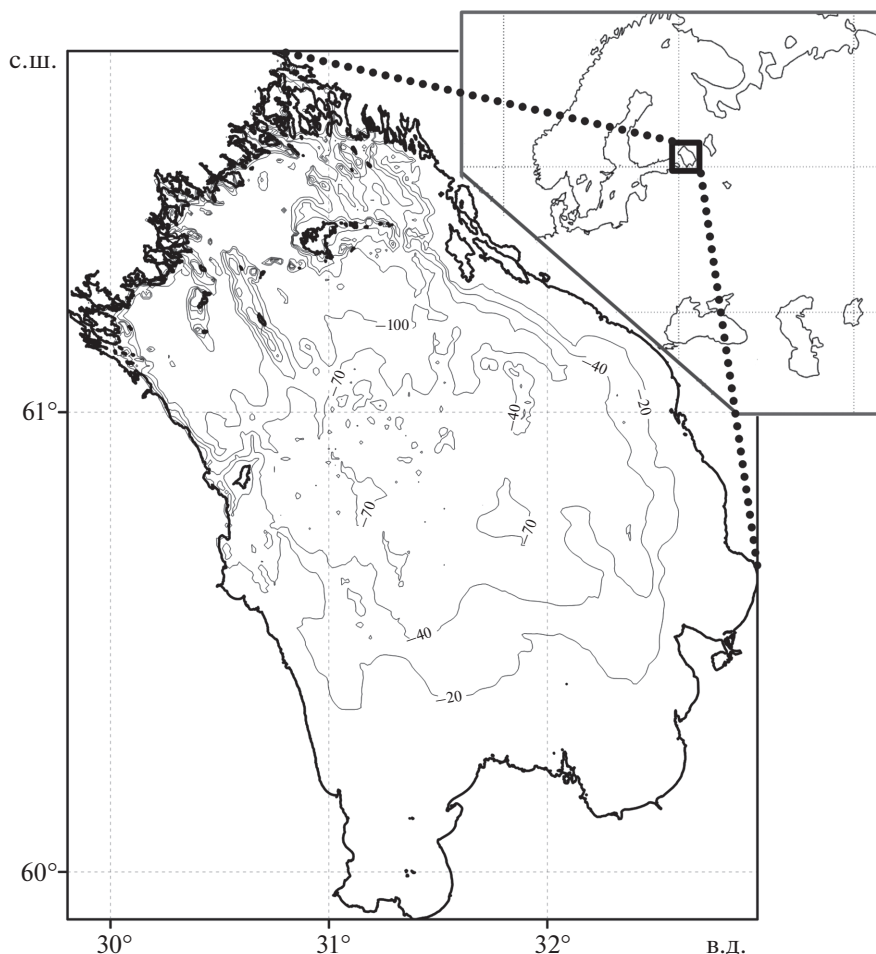


Рис. 1. Ладожское озеро на карте европейски части России. Проведены 20-, 40-, 70- и 100-метровые изобаты.

Алексанин и др., 2015), в работе (Zavialov et al., 2002) метод был модифицирован и его применили для расчета поверхностных течений в Черном море. Похожие методики применяются для расчетов движения облаков (Leese et al., 1971) и морского льда (Emery et al., 1991; Maslanik et al., 1998). Прежде чем метод МСС получил широкое распространение, многие исследователи (Kamachi, 1989; Wahl, Simpson, 1990; Tokmakian, Srtub, 1990; Emery et al., 1992) использовали численные квази-геострофические или чисто адвективные двумерные модели для его проверки.

Метод МСС в основном тестировался в открытом океане и в нескольких случаях в небольших бассейнах, таких как Адриатическое море (Natarstefano et al., 2008), Черное море (Afanasyev et al., 2002) и озере Тахо (Steissberg et al., 2005).

Использованию этого метода исследований, его возможностей, ограничений и модификации применительно к крупному озеру и расчету течений на поверхности Ладожского озера посвящена эта статья.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И РАЗВИТИЕ МЕТОДА МСС ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КРУПНОМУ ОЗЕРУ

Ладожское озеро – крупнейшее европейское озеро (площадь 17800 км², средняя глубина 47.7 м, см. рис. 1), является безальтернативным источником питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга и прилегающих территорий (Румянцев и др., 2018). Поэтому качество воды является ключевым фактором, который во многом определяется процессами переноса различных субстанций в водной толще озера.

Для применения метода МСС к условиям Ладожского озера, небольшого водоема по сравнению с морскими акваториями, например такими как, Балтийское море (площадь в 20 раз больше Ладожского озера) необходимо проведение дополнительных исследований по его адаптации.

Метод требует выделения квадратного окна на первом спутниковом ИК-изображении, с характерными пространственными особенностями распределения температуры поверхности озера. Затем

окно такого же размера перемещается по второму спутниковому ИК-изображению, и определяется такое его положение на втором снимке, для которого пространственная структура внутри окна в наибольшей мере сходна со структурой в исходном окне на первом изображении. В качестве меры схожести используется показатель, называемый максимальной кросс-корреляцией. Положение окна на втором изображении, у которого самый высокий коэффициент кросс-корреляции относительно окна первого изображения, показывает наиболее вероятное смещение его термических особенностей, пропорциональное перемещению воды за период времени между двумя изображениями.

В наших исследованиях мы применяем модифицированный метод – нормализованную кросс-корреляцию (Lewis, 1995; Haralick and Shapiro, 1992) – хорошо себя зарекомендовавший в исследованиях (Gade, 2012). Вычисления проводились в системах расчетов MatLab и Octave. Для работы со снимками применяется программа SeaDAS (SeaDAS).

Выбор информативных исходных данных

Исходными данными для расчетов методом МСС служат серии из нескольких ИК спутниковых изображений акватории Ладожского озера с пространственным разрешением около километра, полученных сканером MODIS в течение суток. Сканер установлен на спутниках Aqua и Terra (NASA Ocean Color).

Озеро, в силу своего расположения и размеров, достаточно непродолжительные периоды бывает полностью свободно от облачности. Важной предварительной задачей при расчетах течений является выбор пар последовательных космических снимков, пригодных для применения метода. В первую очередь это касается отсутствия облачного покрова или дымки, которые вносят существенные искажения в распределение изотерм поверхностного слоя воды Ладожского озера. Так же при выборе пар последовательных космических снимков учитывается время суток, метеорологические условия и разница во времени между снимками в предположении, что за этот временной период термическая структура озера изменится только под действием адвективного смещения изотерм.

Оценки показывают, что достаточно крупномасштабные изменения термической структуры озера летом могут происходить за небольшой отрезок времени, составляющий несколько часов (Филатов, 1991). Если над Ладожским озером в дневное время нет облаков, то происходит интенсивный прогрев верхнего слоя воды, существенно изменяющий его структуру. Температура тонкого поверхностного слоя воды толщиной в несколько

миллиметров при штилевых условиях может значительно отличаться от нижележащего слоя. Наилучшие результаты показывают расчеты, проведенные с использованием снимков, полученных в ночное время или через небольшие промежутки времени, составляющие около 3 ч, на что указывали и исследования на Черном море (Afanasyev et al., 2002).

Метод выбора и анализа космической информации, который мы предлагаем, состоит из нескольких этапов: 1) Анализ срочных данных облачности над Ладожским озером по береговым и островным метеостанциям; 2) Отбор ИК (sea surface temperature – SST) съемок для периода в несколько суток, на которых облачность составляет не более 10% (до 20 последовательных изображений); 3) Географическая привязка и преобразование координат к метрической системе; 4) Преобразование снимков с изображением Ладожского озера в цифровую форму (XYT) и грид, имеющий 220 строк и 190 столбцов. После бланкирования грида береговой линией, получаем массив поверхностной температуры воды озера размером 18817 значений; 5) Построение корреляционной матрицы гридов за исследуемый период используется для оценки меры близости последовательных съемок температуры поверхности Ладожского озера. Далее выбираются пары ИК изображений, для которых коэффициенты корреляции превосходят 0,9, по которым и производится расчет течений методом МСС.

Данная процедура позволяет значительно упростить отбор космической информации, при этом адекватно оценивая состояние поверхности Ладожского озера. Важным моментом в анализе космической информации является выбор промежутков времени между снимками, наиболее приемлемым принимается период в пределах от 3 до 13 ч.

Отсутствие ярко выраженных горизонтальных градиентов температуры на поверхности морских и озерных акваторий, которые необходимы для определения горизонтального переноса, является существенным ограничением метода МСС. Проведенные вычислительные эксперименты для Ладожского озера показали, что при градиенте менее 0,3°C на 50 км оценка течений методом МСС не представляется возможным. Такие термические условия складываются в озере в октябре-ноябре (Науменко, Каретников 2002).

Определение оптимального размера корреляционного окна для условий Ладожского озера

Размер окна поиска (корреляционного окна) определяется структурными особенностями изучаемого поля течений. Обычно для океанов и морей при расчетах МСС используется квадратное

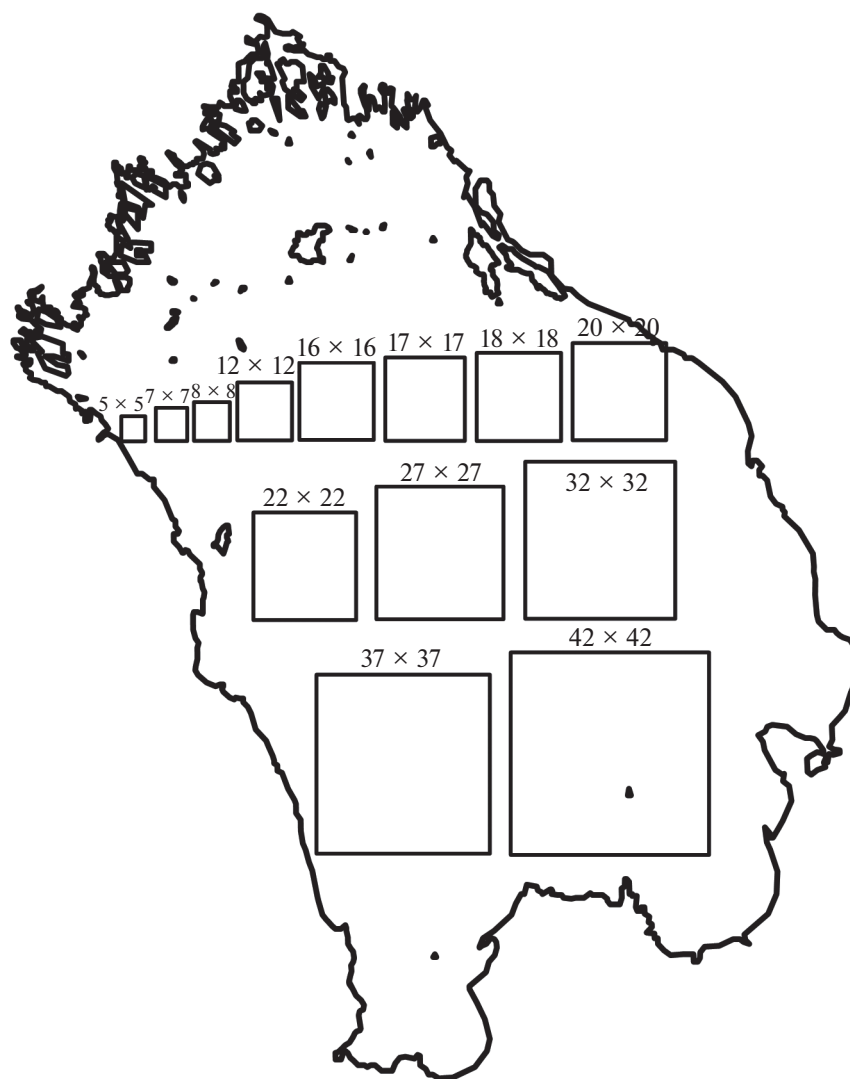


Рис. 2. Размеры корреляционных окон относительно акватории Ладожского озера.

окно 22 на 22 пикселя с шагом смещения в 2 пикселя. Для Ладожского озера пространственные масштабы температурных неоднородностей составляют 25–50 км (Naumenko, 1994).

Для определения оптимального размера корреляционного окна была проведена серия экспериментов, где оно менялось от 5 (5.5 км) до 42 пикселей (46.2 км) с шагом смещения 2 пикселя. Корреляционные окна различных размеров относительно Ладожского озера, представлены на рис. 2. Тестовые расчеты проводились для изображений акватории озера 9 сентября 2009 г. в 15:16 и в 23:00. Временной интервал между снимками составляет 464 мин, пространственная структура изотерм первого снимка подобна структуре изотерм второго снимка, особенно в центральной части озера.

Результаты расчетов для более чем 40 пар снимков для периода открытой воды с июня по сентябрь показали, что для каждой пары ИК-изображений размер корреляционного окна должен определяться индивидуально, но не выходя за пределы от 16×16 до 24×24 пикселей (Гузиватый, Наumenko, 2016).

Для корректного определения векторов скорости течений на поверхности Ладожского озера мы применили процедуру исключения аномальных значений на основе анализа натуральных наблюдений поверхностных течений, при которой не принимаются во внимание скорости >0.4 м/с и коэффициентом корреляции <0.8 между матрицами пикселей окна шаблона первого и центром шаблона окна второго изображения, рассчитанных методом МСС.

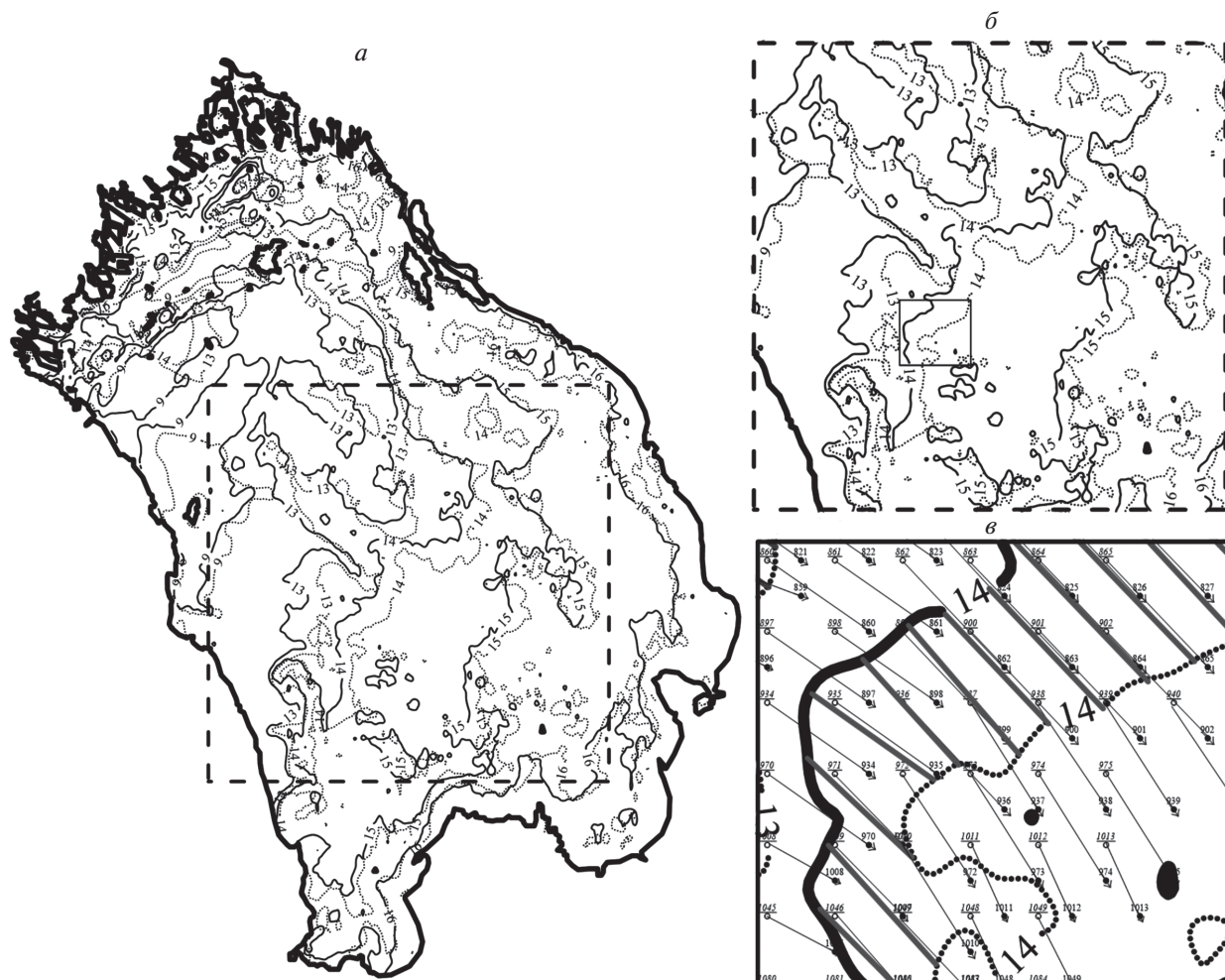


Рис. 3. Скорости и направления течений, определенные методом маркеров и МСС между двумя снимками: *a* – композитное изображение с наложением изотерм на снимках, выполненных 09.09.2009 в 15:16: и 23:00 мин Ладожское озеро и *б* – увеличенный район, *в* – район, для которого проводились вычисления. Сплошная линия – изотермы первого снимка, пунктирная изотермы – второго снимка.

Верификация метода МСС для Ладожского озера

Для проверки соответствия скоростей и направлений течений, рассчитанных методом МСС, предложен подход, заключающийся в измерении скорости перемещения маркеров (характерных точек на изотермах) между двумя снимками с последующим расчетом векторов скорости (Александрин, 2013). Этот подход был применен для тех же ИК-изображений, что и при определении оптимального размера корреляционного окна. Так, на рис. 3 у западного берега Ладожского озера, в районе о. Коневец наблюдается обширная область вод с пониженной температурой образовавшаяся под действием юго-западного ветра. Затоки воды с пониженной температурой начали распространяться и на основную часть акватории Ладожского озера, что проявляется в смещении изотерм: за 7 ч 44 мин изотермы первого снимка, (рис. 3а),

относительно второго (рис. 3б), меняют свое положение примерно на 5 км, при сохранении на этих снимках пространственного подобия изотерм.

Происходит перенос поверхностных вод во всей центральной части на юго-восток, т.е. примерно под углом 45° относительно направления ветра. Условной границей, где течения уже не прослеживаются, служит изотерма (16°C), после нее до самого берега переноса не наблюдается.

Сравнение векторов движения выбранных маркеров и результатов расчетов МСС показывает, что примерно 60% направлений между перемещениями маркеров и рассчитанными значениями векторов имеют отклонения не более $\pm 5^\circ$. Около 6% составляют максимальные отклонения, достигающие $\pm 20^\circ$.

Разность скоростей, определенных методом маркеров и МСС, положительна, модальная ве-

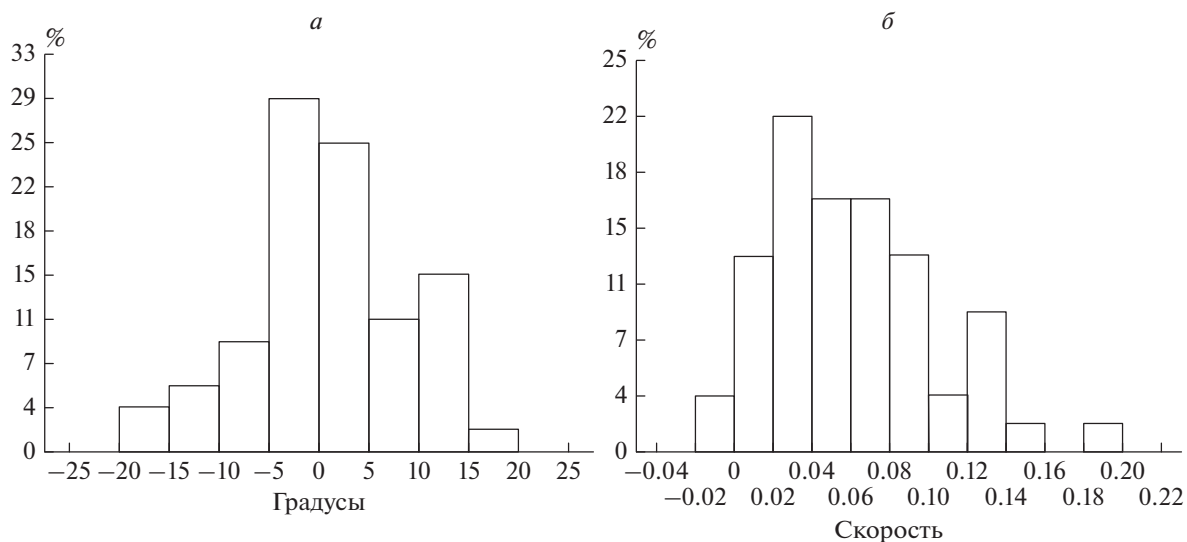


Рис. 4. Отклонения между векторами, определенными методом маркеров и рассчитанными методом МСС: по направлению (а), скорости (б).

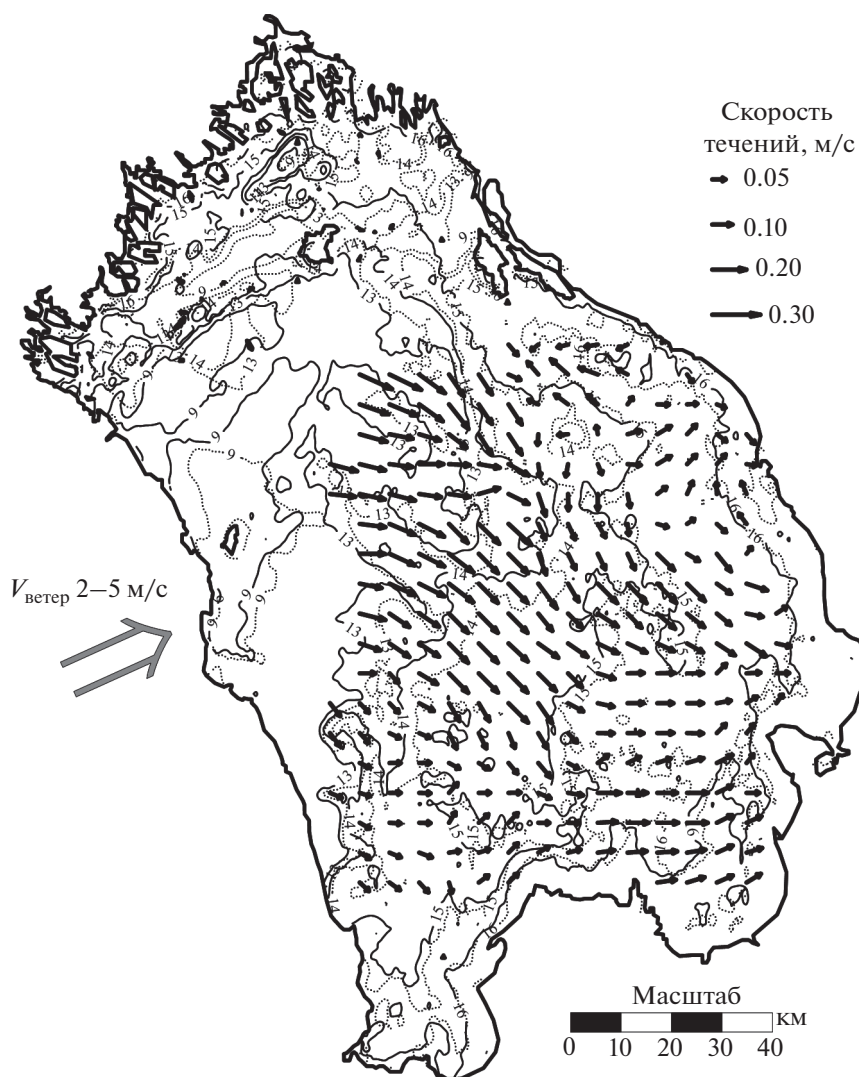


Рис. 5. Смещение изотерм и результирующие течения в поверхностном слое Ладожского озера при воздействии юго-западного ветра.

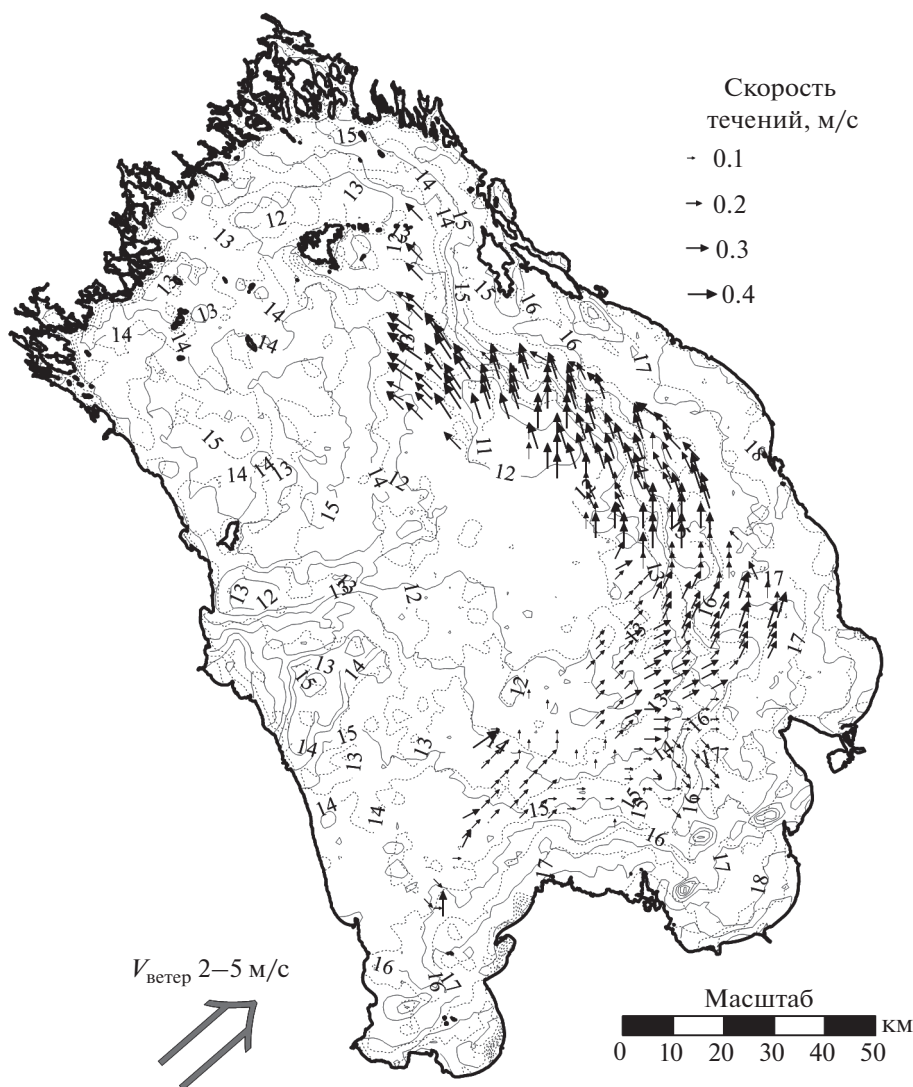


Рис. 6. Поверхностные течения, рассчитанные на основании снимков, полученных со спутников серии MODIS 3 июля 2010 года в 6:54 и 9:16.

личина составляет от 2 до 4 см/с, это указывает на некоторое завышение скоростей (рис. 4б), однако сравнимое с точностью инструментальных измерений течений.

Из проведенного сравнения можно заключить, что метод МСС дает реалистичные результаты (см. рис. 5), адекватно отражающие динамику поверхностного слоя воды Ладожского озера.

ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ПЕРЕНОСА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ В ОЗЕРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕТРОВЫХ СИТУАЦИЯХ

На поверхность Ладожского озера практически непрерывно воздействует поле ветра, поэтому достаточно очевидным результатом этого воздействия является движение поверхностного слоя

воды, причем за счет трения — это движение передается более глубоким слоям. Результаты исследований (Боуден, 1988) показывают, что течение на поверхности направлено примерно по ветру, а скорость составляет около 3% от скорости ветра, измеренной на высоте 10 м. Причем его направление и сила для различных районов может иметь значительные отличия.

Особенности пространственного распределения поверхностных течений в Ладожском озере в период открытой воды выявлены с помощью метода МСС при различных ветровых ситуациях, по их результатам построены схемы переноса поверхностного слоя.

Характерным примером может служить рис. 6. Основой для расчетов послужила пара изображений поверхности Ладожского озера в ИК диа-

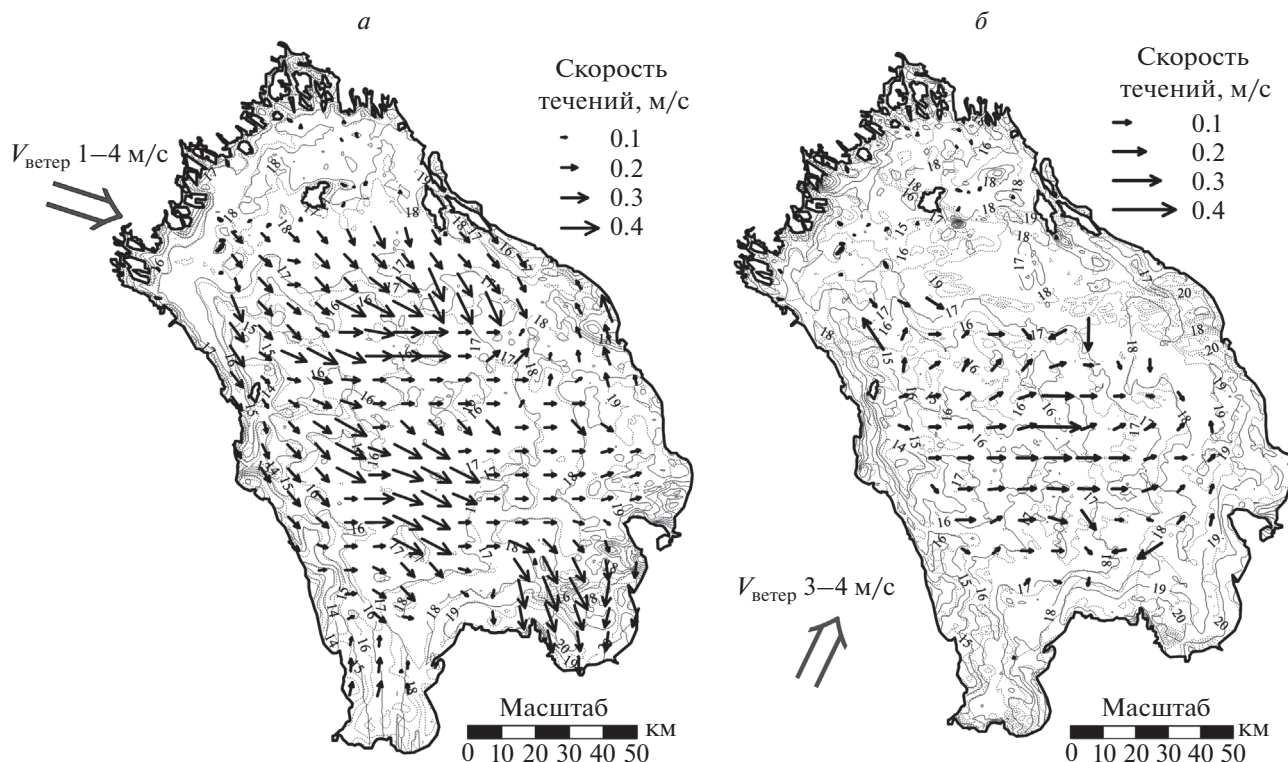


Рис. 7. Поверхностные течения, рассчитанные на основании снимков, полученных со спутников серии MODIS: *а* – 1 августа в 19:40 и 2 августа в 5:20 2012 года, *б* – 3 августа 2012 года в 4:25 и 13:50.

пазоне полученных со спутника Тегга в 6:54 и 9:16 3 июля 2010 г. Время между изображениями составляет 2 ч 22 мин. Данные о ветре, который наблюдался в этот период над Ладожским озером, получены с метеостанции г. Сортавала, о. Валаам, г. Шлиссельбург – юго-западный, 2–5 м/с.

На рис. 6 видны зоны повышенной температуры в районе восточного побережья и впадения рек Бурная, Волхов и Свирь и зоны повышенных температурных градиентов, которые проходит вдоль всего южного и восточного берега. Если в центре озера температура примерно равна 11°C, то на восточном побережье достигает 17–19°C. Стрелки показывают поле течений, где основные поверхностные потоки проявляются как раз в зоне повышенных градиентов и направлены вдоль восточного побережья. Направление потоков меняется с северо-восточного на северное и далее переходит на северо-запад, прижимая тем самым прибрежные воды, имеющие повышенную температуру к восточному берегу.

Эволюция термического состояния Ладожского озера, а вместе с ним и перестройка системы течений на поверхности под воздействием ветра юго-западного и западного направлений представлена на рис. 7*а* и 7*б*. Для расчетов были использованы 2 пары спутниковых изображения: 1 августа в 19:40 и 2 августа в 5:20 (*а*), 3 авгу-

ста в 4:25 и 13:50 2012 г. (*б*). Если в начале периода, 1 августа, ветер был северо-западного направления, то к 3 августа он перешел на юго-западный. Одновременно система поверхностных течений начала перестраивается, стал преобладать западный перенос, что в итоге привело к эволюции термического состояния озера.

ВЫВОДЫ

Первое применение метода МСС для расчета поверхностных течений Ладожского озера показало его перспективность в условиях практического отсутствия прямых измерений течений. Метод адаптирован для крупного озера и предложены новые процедуры выбора наиболее информативных космических ИК съемок для анализа течений. Проведенные исследования показывают, что достоверные результаты получаются при интервале между снимками от 3 до 13 ч, а лучшие результаты можно получить по ночным снимкам. Размеры корреляционного окна для расчета полей течений применительно к условиям Ладожского озера находятся в пределах от 16×16 до 24×24 пикселя. Разработан и апробирован подход по определению меры связности изображений, полученных с космических аппаратов, позво-

ляющий значительно сократить время, затрачиваемое на обработку информации больших объемов.

Построены системы поверхностных течений для определенных ветровых ситуаций для периода открытой воды.

Метод дает возможность исследовать динамические процессы на поверхности Ладожского озера: синоптические и мезомасштабные вихри и грибовидные структуры, распространение речных вод и т.п. практически по всей акватории озера в отсутствии облачности.

Использование метода в настоящее время является оптимальной процедурой для верификации системы поверхностных течений, рассчитанных с использованием термогидродинамических моделей.

Метод кросс-корреляции, адаптированный для Ладожского озера, может быть применен для оценки поверхностных течений в других крупных озерах мира.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Загуменнов 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.
- Андреев О.А., Воробьева Л.В.* Ветровая и стоковая циркуляция Ладожского озера (численные эксперименты) // Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах. Л.: Наука, 1986. С. 17–21.
- Астраханцев Г.П., Егорова Н.Б., Оганесян Л.А., Руховец Л.А.* Трехмерная нестационарная модель Ладожского озера // Труды ГГИ. 1988. № 321. С. 32–40.
- Бондур В.Г., Мурынин А.Б.* Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 3–14.
- Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
- Гузиватый В.В., Науменко М.А.* Оценка течений на поверхности крупного озера с помощью последовательных инфракрасных изображений // Труды V Всероссийская конференция “Ледовые и термические процессы на водных объектах России” 11–14 октября 2016 г., г. Владимир, 2016. С. 113–119.
- Иванов А.Ю., Литовченко К.Ц., Альперс В., Науменко М.А., Каретников С.Г.* Проявления гидрофизических процессов на поверхности ладожского озера по данным радиолокатора с синтезированной апертурой спутников ERS // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 63–75.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Особенности проявления на спутниковых изображениях гидродинамических процессов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 145–160.
- Малинина Т.И., Филатова И.В., Филатов Н.Н.* Изменчивость водного баланса и моделирование течений Ладожского озера // Материалы школы-семинара: Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водоемах. Л.: Наука, 1984. С. 191–197.
- Науменко М.А., Каретников С.Г.* Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // Докл. АН. 2002. Т. 386. № 2. С. 250–253.
- Охлопкова А.Н.* Течения Ладожского озера // Труды Лаб. озераведения ЛГУ. 1966. Т. 20. С. 265–278.
- Румянцев В.А., Измайлова А.В., Дробкова В.Г., Кондратьев С.А.* Современное состояние и проблемы озерного фонда европейской части России // Вестник РАН. 2018. Т. 88. № 6. С. 539–550.
<https://doi.org/10.7868/S0869587318060075>
- Филатов Н.Н.* Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 191 с.
- Afanasyev Y.D., Kostianoy A.G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M.* Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № 8. P. 3098–4003.
- Emery W.J., Fowler C., Clayson C.A.* Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1992. V. 9. P. 286–304.
- Emery W.J., Fowler C., Hawkins J., Preller R.* Satellite image inferred sea ice motion in Fram Strait, the Greenland Sea and the Barents Sea // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 4751–4768.
- Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D.L.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № 11. P. 12865–12878.
- Gade Martin and Seppke, Benjamin and Dreschler-Fischer, Leonie.* Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33. P. 3122–3146.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2011.628711>
- Haralick Robert M., and Linda G. Shapiro.* Computer and Robot Vision. V. II. Addison-Wesley. 1992. P. 316–317.
- Kamachi M.* Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № 12. P. 18227–18233.
- Kelly K.A., Strub P.T.* Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coast-

- al transition zone // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № 6. P. 9653–9668.
- Leese J.A., Novak C.S., Clarke B.B.* An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross-correlation // *J. Appl. Meteorol.* 1971. V. 10. P. 110–132.
- Lewis J.P.* Fast Normalized Cross-Correlation // *Industrial Light & Magic.* 1995. № 10.
- Maslanik J., Agnew T., Drinkwater M., Emery W., Fowler C., Kwok R., Liu A.* Summary of ice-motion mapping using passive microwave data // November 1998, National Snow and Ice Data Center (NSIDC) Special Publication 8, Report prepared for NSIDC at the request of the NSIDC Polar Data Advisory Group, 1998. 25 p.
- NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.
- Naumenko M.A.* Some Aspects of the Thermal Regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Onega // *Water Pollution Res. J. of Canada.* 1994. V. 29. № 2/3. P. 423–439.
- Notarstefano G., Poulain P.-M., Mauri E.* Estimation of Surface Currents in the Adriatic Sea from Sequential Infrared Satellite Images // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2008. V. 25. № 2. P. 271–285.
- SeaDAS – SeaWiFS Data Analysis System. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov/seadas>.
- Steissberg T.E., Simon J.H., Geoffrey S.S.* Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery // *Geophysical Research Letters.* 2005. V. 32. L11402. 4 p.
- Tokmakian R., Strub P., McClean-Padman J.* Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1990. V. 7. P. 852–865.
- Wahl D.D., Simpson J.J.* Physical processes affecting the objective determination of near-surface velocity from satellite data // *Oceanography.* 1990. V. 95. P. 13511–13619.
- Zavialov P.O., Grigorieva J.V., Moeller Jr.O., Kostianoy A.G., Gregoire M.* Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 10. P. 3160–3178.

Estimation of Velocity of Upper Layer of Lake Ladoga by Using of Maximum Cross Correlation (MCC) Method

V. V. Guzivaty¹, M. A. Naumenko¹, and V. A. Rumyantsev¹

¹*Institute of Limnology of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

The first application of Maximum Cross Correlation method for the computation of the surface currents of Lake Ladoga gave very promising results in the lack of direct measurements of currents. The method is adapted for a large lake and the new procedures are proposed to select the most informative infrared satellite surveys for the lake flow analysis. The most favorable conditions, parameters, and limitations for the application of the Maximum Cross Correlation method for Lake Ladoga are obtained. Surface current systems have been constructed for specific wind situations for the open water period. The developed method based on the analysis of successive satellite IR surveys of Lake Ladoga surface makes it possible to estimate the dynamics of the waters and can be applied to other large lakes.

Keywords: velocity of upper layer of large lake, maximum cross correlation method, Lake Ladoga

REFERENCES

- Afanasyev Y.D., Kostianoy A.G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M.* Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea'99 experiment // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 8. P. 3098–4003.
- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Karnackij A.Yu.* Avtomaticheskij raschet skorostej poverhnostnyh techenij okeana po posledovatel'nosti sputnikovyh izobrazhenij [Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2013. T. 10. № 2. P. 131–142.
- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Zagumyonov A.A., Kachur V.A.* Povyshenie tochnosti rascheta skorostej poverhnostnyh techenij po sputnikovym izobrazheniyam [Improving the accuracy of calculation of surface flow velocities from satellite images] // *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk.* 2015. № 3 (181). P. 59–66.
- Andreev O.A., Vorob'eva L.V.* Vetrovaya i stokovaya cirkulyaciya Ladozhskogo ozera (chislennye eksperimenty) [Wind and runoff circulation of Lake Ladoga (numerical experiments)] // *Modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gidrologicheskikh processov v ozerah.* L.: Nauka, 1986. P. 17–21.
- Astrahancev G.P., Egorova N.B., Oganessian L.A., Ruhovec L.A.* Trekhmernaya nestacionarnaya model' Ladozhskogo ozera [Three-dimensional unsteady model of Lake Ladoga] // *Trudy GGI.* 1988. № 321. P. 32–40.
- Bondur V.G., Murynin A.B.* Metody vosstanovleniya spektrov morskogo volneniya po spektram aerokosmicheskikh izobrazhenij [Methods for Sea Wave Spectra Retrieval Using Aerospace Image Spectra] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2015. № 6. P. 3–14.
- Bouden K.* Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnyh vod. [Physical oceanography of coastal waters] M.: Mir, 1988. 324 p.
- Emery W.J., Fowler C., Clayson C.A.* Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 1992. V. 9. P. 286–304.
- Emery W.J., Fowler C., Hawkins J., Preller R.* Satellite image inferred sea ice motion in Fram Strait, the Greenland

- Sea and the Barents Sea // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 4751–4768.
- Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D.L.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № 11. P. 12865–12878.
- Filatov N.N.* *Gidrodinamika ozer.* [Hydrodynamics of lakes] SPb.: Nauka, 1991. 191 p.
- Gade Martin and Seppke, Benjamin and Dreschler-Fischer, Leonie.* Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // *International Journal of Remote Sensing.* 2012. V. 33. P. 3122–3146. doi: 10.1080/01431161.2011.628711
- Guzivaty V.V., Naumenko M.A.* Ocenka techenij na poverhnosti krupnogo ozera s pomoshch'yu posledovatel'nyh infrakrasnyh izobrazhenij [Assessment of the surface currents of a large lake using sequential infrared images] // *Trudy V Vserossijskaya konferenciya "Ledovye i termicheskie processy na vodnyh ob'ektah Rossii"* 11–14 oktyabrya 2016 g., g. Vladimir, 2016. P. 113–119.
- Haralick, Robert M., and Linda G. Shapiro.* *Computer and Robot Vision.* V. II. Addison-Wesley. 1992. P. 316–317.
- Ivanov A.Yu., Litovchenko K.C., Alpers V., Naumenko M.A., Karetnikov S.G.* Proyavleniya gidrofizicheskikh processov na poverhnosti Ladozhskogo ozera po dannym radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj sputnikov ERS [Manifestations of hydrophysical processes on Lake Ladoga surface according to synthetic aperture radars data from ERS satellites] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 1999. № 4. P. 63–75.
- Kamachi M.* Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № 12. P. 18227–18233.
- Kelly K.A., Strub P.T.* Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № 6. P. 9653–9668.
- Lavrova O.Yu., Mityagina M.I.* Osobennosti proyavleniya na sputnikovyh izobrazheniyah gidrodinamicheskikh processov v oblastyakh intensivnogo cveteniya fitoplanktona [Features of Hydrodynamic Processes's Manifestation on Satellite Images of Intense Phytoplankton Bloom Areas] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2016. № 1–2. P. 145–160.
- Leese J.A., Novak C.S., Clarke B.B.* An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross-correlation // *J. Appl. Meteorol.* 1971. V. 10. P. 110–132.
- Lewis J.P.* *Fast Normalized Cross-Correlation* // *Industrial Light & Magic.* 1995. № 10.
- Malinina T.I., Filatova I.V., Filatov N.N.* Izmenchivost' vodnogo balansa i modelirovanie techenij Ladozhskogo ozera [Variability of water balance and modeling of Lake Ladoga flows] // *Materialy shkoly-seminara: Vzaimodejstvie mezhdru vodoy i sedimentami v ozerah i vodoemah.* L.: Nauka, 1984. P. 191–197.
- Maslanik J., Agnew T., Drinkwater M., Emery W., Fowler C., Kwok R., Liu A.* Summary of ice-motion mapping using passive microwave data // November 1998, National Snow and Ice Data Center (NSIDC) Special Publication 8, Report prepared for NSIDC at the request of the NSIDC Polar Data Advisory Group, 1998. 25 p.
- NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.
- Naumenko M.A.* Some Aspects of the Thermal Regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Onega // *Water Pollution Res. J. of Canada.* 1994. V. 29. № 2/3. P. 423–439.
- Naumenko M.A., Karetnikov S.G.* Sezonnaya evolyuciya prostranstvennogo raspredeleniya temperatury poverhnosti vody Ladozhskogo ozera v svyazi s ego morfometrijei [Seasonal evolution of the spatial distribution of water surface temperature in Lake Ladoga related to its morphometry] // *Doklady Akademii Nauk.* 2002. T. 386. № 2. P. 250–253.
- Notarstefano G., Poulain P.-M., Mauri E.* Estimation of Surface Currents in the Adriatic Sea from Sequential Infrared Satellite Images // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2008. V. 25. № 2. P. 271–285.
- Okhlopkova A.N.* Teleniya Ladozhskogo ozera [Currents of Lake Ladoga] // *Trudy Lab. ozerovedeniya LGU.* 1966. T. 20. P. 265–278.
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Drabkova V.G., Kondratyev S.A.* Sovremennoe sostoyanie i problemy ozyornogo fonda evropejskoj chasti Rossii [Modern state and problems of the lake's fund of the European part of Russia] // *Vestnik RAN.* 2018. T. 88. № 6. P. 539–550. doi: 10.7868/S0869587318060075
- SeaDAS – SeaWiFS Data Analysis System. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov/seadas>.
- Steissberg T.E., Simon J.H., Geoffrey S.S.* Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery // *Geophysical Research Letters.* 2005. V. 32. L11402. 4 p.
- Tokmakian R., Strub P., McClean-Padman J.* Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1990. V. 7. P. 852–865.
- Wahl D.D., Simpson J.J.* Physical processes affecting the objective determination of near-surface velocity from satellite data // *Oceanography.* 1990. V. 95. P. 13511–13619.
- Zavialov P.O., Grigorieva J.V., Moeller Jr.O., Kostianoy A.G., Gregoire M.* Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 10. P. 3160–3178.