

УДК 556.555.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОЙ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕЧЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ АКВАТОРИЙ

В. В. Гузиватый*, **М. А. Науменко**

Институт озераведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *guzivaty@gmail.com

Метод максимальной кросс-корреляции (МСС) впервые был использован для Ладожского озера в 2016 г. Метод позволяет оценить динамику вод в мезо- и синоптических масштабах на поверхности морей и крупных озер с использованием последовательных спутниковых инфракрасных снимков с пространственным разрешением 1×1 км. Обсуждаются методические аспекты применения и ограничения метода МСС для крупных акваторий. Предложенные для Ладожского озера процедуры выбора наиболее благоприятных метеорологических условий и анализа космической информации показали свою эффективность при применении метода МСС для акваторий с площадями от 9,7 до 422 тыс. км². Методом максимальной кросс-корреляции проведены оценки поверхностных течений для крупных внутренних акваторий европейской части Российской Федерации, включающих Ладожское, Онежское озеро, Белое, Балтийское, Черное и Каспийское море для конкретных ветровых ситуаций в период открытой воды. Выявлен период в сезонном аспекте, для которого метод МСС для указанных акваторий наиболее результативен, показана его перспективность в условиях отсутствия *in situ* измерений течений.

Ключевые слова: течения на поверхности морей и крупных озер; метод МСС; Ладожское озеро; Онежское озеро; Белое, Балтийское, Черное и Каспийское море

Для цитирования: Гузиватый В. В., Науменко М. А. Применение метода максимальной кросс-корреляции для оценки течений на поверхности крупных внутренних акваторий // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 65–78. doi: 10.17076/lim1854

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

V. V. Guzivaty*, M. A. Naumenko. APPLICATION OF THE MAXIMUM CROSS-CORRELATION METHOD FOR ESTIMATION OF SURFACE CURRENTS OF LARGE INLAND WATER AREAS

*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *guzivaty@gmail.com*

The maximum cross-correlation (MCC) method was first used for Lake Ladoga in 2016. The method enables the assessment of water dynamics at meso- and synoptic scales on the surface of seas and large lakes using sequential satellite infrared images with a spatial resolution of 1×1 km. The article discusses methodological aspects of application and limitations of the MCC method for large water areas. The procedures of selecting the most favorable meteorological conditions and space data analysis proposed for Lake Ladoga have shown their effectiveness when applying the MCC method for areas from 9.7 to 422 thous. km². The maximum cross-correlation method was used to estimate surface currents for large inland water areas of the European part of the Russian Federation, including Lake Ladoga, Lake Onego, the White, Baltic, Black and Caspian Seas for specific wind situations during the open water period. The period in the seasonal aspect, for which the MCC method for these water areas is the most effective, is revealed, and its prospects in the absence of *in situ* measurements of currents are shown.

Keywords: currents on the surface of seas and large lakes; MCC method; Lake Ladoga; Lake Onego; White Sea; Baltic Sea; Black and Caspian Seas

For citation: Guzivaty V. V., Naumenko M. A. Application of the maximum cross-correlation method for estimation of surface currents of large inland water areas. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 65–78. doi: 10.17076/lim1854

Funding. Financial support of the research was provided from the federal budget for the fulfillment of the state task FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies of its basin and adjacent territories under the influence of natural and anthropogenic factors against the background of climatic changes”.

Введение

Течения в озерах, морях и океанах вне зависимости от размера акватории определяют процессы тепло- и массопереноса, распределение химических элементов и гидробионтов. Крупномасштабные измерения скорости и направления течений на поверхности морей и крупных озер могут быть проведены либо с использованием специализированных полигонов, состоящих из буйковых станций, либо с использованием автономных дрейфующих буев со спутниковыми системами определения их координат и передачи данных. Эти измерения связаны со значительными затратами и технически крайне сложны. Пространственно-временные вариации течений на поверхности Ладожского озера, крупнейшего в Европе, играют важную роль в формировании качества питьевой воды для Санкт-Петербурга и прилегающих территорий. Лишь долговременные измерения течений позволяют представить крупномасштабную циркуляцию в озере и дать количественную оценку системы течений, меняющейся в зависимости от сезона и ветровой ситуации. Институтом озероведения РАН в 60–80-е годы

прошлого века проводились разовые измерения течений в Ладожском озере с заякоренных судов [Малинина и др., 1984] и непрерывные регистрации с использованием буйковых станций [Филатов, 1991]. Эти измерения до сих пор повторить или существенно дополнить так и не удалось. В настоящее время мезомасштабная и синоптическая циркуляция вод Ладожского озера недостаточно изучена из-за отсутствия регулярных гидрологических работ. Мониторинг скорости и направления течений в Ладожском озере является необходимым звеном для верификации двух- и трехмерных термогидродинамических моделей крупных озер [Охлопкова, 1966; Андреев, Воробьева, 1986; Астраханцев и др., 1988; Филатов, 1991; Диагноз..., 2020].

Современные методы дистанционного зондирования позволяют рассчитать геострофические течения на поверхности морей и океанов по альтиметрическим измерениям с помощью радаров X-диапазона [Wunsch, 1992], а также с использованием данных с радаров с синтезированной апертурой (SAR) [Romeiser et al., 2010]. Для оценки системы поверхностных течений на значительных площадях достаточно перспективен метод MCC, разработанный

В. Эмери в 1986 году [Emery et al., 1986] на основе теории распознавания образов, использующий последовательные ИК-съемки акваторий океанов и морей, которые поступают намного чаще, чем данные с альтиметров или SAR. Метод разработан для обнаружения поверхностных потоков, связанных с видимыми движениями структурных особенностей горизонтальных температурных градиентов. Он получил достаточно широкое распространение и считается фактически стандартом, с которым сверяют скорости и направления течения, полученные другими методами, в том числе и модельными [Kelly, Strub, 1992]. Их использование позволяет изучать обширные районы, затрачивая минимальные ресурсы [Алексанин и др., 2013]. В нашей стране имеются единичные публикации по этой теме [Afanasyev et al., 2002]. В работе [Zavialov et al., 2002] метод был модифицирован, и его применили для расчета поверхностных течений в Черном море. Метод МСС в основном применялся в открытом океане и в нескольких случаях в небольших бассейнах, таких как Адриатическое море [Notarstefano et al., 2008], Черное море [Afanasyev et al., 2002], Балтийское море [Gade et al., 2012] и озеро Тахо [Steissberg et al., 2005]. Для верификации метода МСС использовали численные квази-геострофические или чисто адвективные двумерные модели [Kamachi, 1989; Emery et al., 1992], хотя методика МСС широко применяется во всем мире, в нашей стране этот метод используется достаточно редко.

Цель настоящей статьи заключается в представлении и обсуждении особенностей использования метода МСС для крупных внутренних акваторий европейской части Российской Федерации, а именно для Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей, а также для Онежского и Ладожского озер. Эти акватории отличаются друг от друга как размерами и широтным расположением, так и пространственно-временной изменчивостью термодинамических процессов. Для конкретных ветровых ситуаций и периодов времени около 4 часов представлены схемы вычисленных поверхностных течений в указанных водоемах.

Методические особенности применения метода МСС для внутренних водоемов и исходные данные

Метод МСС был применен для оценки течений на поверхности Ладожского озера, небольшого по сравнению с океанами и морскими акваториями водоема (рис. 1, табл. 1), в 2016 году [Гузиватый, Науменко, 2016].

Несомненно, это обстоятельство потребовало проведения дополнительных методических разработок по его адаптации и верификации для оценки течений к условиям озера [Гузиватый и др., 2020].

Исходными данными для расчетов методом МСС послужили серии из нескольких последовательных ИК-спутниковых изображений акватории (табл. 2) Ладожского озера с пространственным разрешением около километра, полученных сканером MODIS с временным интервалом в несколько часов. Сканер установлен на спутниках Aqua и Terra [NASA...].

На предварительном этапе анализа представляет определенную трудность найти два последовательных спутниковых снимка с небольшим промежутком времени между ними, что связано с параметрами орбиты спутников и облачным покровом над водным объектом, искажающими термические характеристики поверхности воды. Ладожское озеро, в силу своего расположения и размеров, достаточно непродолжительные периоды бывает полностью свободно от облачности или дымки, что вносит искажения в распределение изотерм поверхностного слоя воды. При выборе пар последовательных космических снимков необходимо учитывать время суток, метеорологические условия и разницу во времени между снимками, предполагая, что за этот временной период термическая структура озера изменяется только под действием адвективного смещения изотерм. Известно, что достаточно крупномасштабные изменения термической структуры озера летом могут происходить за небольшой отрезок времени, составляющий несколько часов [Филатов, 1991].

В дневное время в штилевую и безоблачную погоду над Ладожским озером происходит интенсивный прогрев тонкого поверхностного слоя воды толщиной в несколько миллиметров, температура которого может значительно отличаться от температуры нижележащего слоя. Например, такие условия наблюдаются в локальном районе севернее Валаама (рис. 2), где температура достигает 20 °С, хотя вокруг она около 18 °С. Иногда такой район может занимать до половины акватории озера, и снимки приходится отбраковывать. В ночные часы такого явления не наблюдается, поэтому количество пригодных для применения методом МСС снимков больше. Методика МСС, как отмечал [Doronzo et al., 2015], достаточно хорошо работает при временном интервале в пределах 6 часов и на Черном море при временном интервале в несколько часов [Afanasyev et al., 2002].

Кроме облачного покрова существует еще одно ограничение в применении метода МСС

для различных акваторий, заключающееся в отсутствии ярко выраженных горизонтальных градиентов температуры на поверхности, которые представляют собой необходимые структурные элементы для определения горизонтального переноса.

Применение метода МСС для расчетов поверхностных течений в Ладожском озере показало, что существуют локальные районы, как, например, на рис. 2 в центральной части, где векторы течений отсутствуют. Связано это с тем, что градиенты температуры здесь не превышают $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 50 км. Термические условия, при которых на поверхности воды градиенты имеют такие же или меньшие величины, складываются в озере в октябре-ноябре [Науменко, Каретников, 2002]. В этот период определить циркуляцию в озере не удалось.

Для применения метода сделаны следующие допущения. Температуру SST (Sea Surface Temperature) следует рассматривать как консервативный пассивный индикатор. Метод МСС можно использовать только для отслеживания течений, направленных вдоль температурных градиентов, поэтому он не подходит для обнаружения токов, движущихся вдоль поверхности температурных фронтов [Emery et al., 1986].

В наших исследованиях мы применяем модифицированный метод – нормализованную кросс-корреляцию [Haralick, Shapiro, 1992; Lewis, 1995] – хорошо себя зарекомендовавший в исследованиях [Gade, 2012]. Вычисления проводились в системах расчетов MatLab и Octave. Для первичной подготовки космической информации использовалась программа SeaDAS [SeaDAS...].

Разработанный нами метод отбора космической информации состоит из трех этапов. Первый заключается в выборе периодов в несколько суток, когда облачность над Ладожским озером составляет не более 10 процентов. Следующий – обработка отобранных изображений, полученных с сайта NASA Ocean Color [NASA...] для этих периодов. Заключительный этап представляет собой оценку меры близости термического состояния поверхности Ладожского озера на космических снимках. На этом этапе рассчитываются коэффициенты корреляции между массивами, выбираются пары ИК-изображений, для которых коэффициенты превышают 0,9 и вводится весовой коэффициент, учитывающий время между снимками [Гузиватый и др., 2020].

Для выявления структурных особенностей изучаемого поля течений проведены исследования по определению размера окна поиска (корреляционного окна). В условиях Ладожского озера это в первую очередь ветровая цирку-

ляция распространения речных вод. Обычно для океанов и морей при расчетах МСС используется окно 22×22 пикселя с шагом смещения в 2 пикселя, однако для Ладожского озера пространственные мезомасштабные температурные неоднородности не превышают несколько десятков километров [Naumenko, 1994]. Для определения оптимального размера корреляционного окна была проведена серия экспериментов, где оно менялось от 5 (5,5 км) до 42 (46,2 км) пикселей с шагом смещения 2 пикселя. Результаты расчетов для более чем 40 пар снимков в период открытой воды с июня по сентябрь показали, что наибольшее количество значимых векторов приходится на корреляционное окно размером 18×18 пикселей [Гузиватый и др., 2020]. Следует указать, что существуют и другие подходы в реализации этого метода, например, основанные не на одном окне шаблона, а на нескольких отдельных окнах разных размеров [Doronzo et al., 2015], а также вращении корреляционного окна [Emery et al., 1992].

Для проверки соответствия скоростей и направлений течений, рассчитанных методом МСС к условиям Ладожского озера, мы используем подход, предложенный Алексаниным с соавторами [2013], заключающийся в измерении скорости перемещения маркеров (характерных точек на изотермах) между двумя снимками с последующим расчетом векторов скорости. Сравнение векторов движения выбранных маркеров и результатов расчетов МСС для Ладожского озера 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 величина составляет от 2 до 4 см/с, что указывает на некоторое завышение скоростей, однако сравнимое с точностью инструментального измерения течений [Гузиватый и др., 2020].

Скорости значимых поверхностных течений при нештормовых ветрах не превышают 0,4 м/с на поверхности Ладожского озера, что было показано на основе анализа натуральных наблюдений [Филатов, 1991]. Исходя из этого предположения, мы исключили из анализа скорости течения $> 0,4$ м/с, если одновременно коэффициент кросс-корреляции $< 0,8$. Это условие достаточно жесткое, но позволяет избежать аномальных значений поверхностных течений. Хотя Эмери с соавторами [Emery et al., 1986] полагают, что для океанских условий можно использовать и более низкий коэффициент кросс-корреляции.

Применение метода МСС для акваторий с различными размерами и термическим режимом

Метод МСС, использующий последовательные космические снимки, достаточно хорошо зарекомендовал себя для оценки поверхностных течений в Ладожском озере в период открытой воды [Гузиватый и др., 2020]. Предло-

женная нами усовершенствованная методика, разработанная к условиям Ладожского озера, требовала подтверждения, что она может быть применена к акваториям значительно большего размера и имеющим другие термические условия. В частности, стояла задача показать на примерах, что данный подход дает реальные, не противоречащие природе результаты. На крупных внутренних акваториях европейской

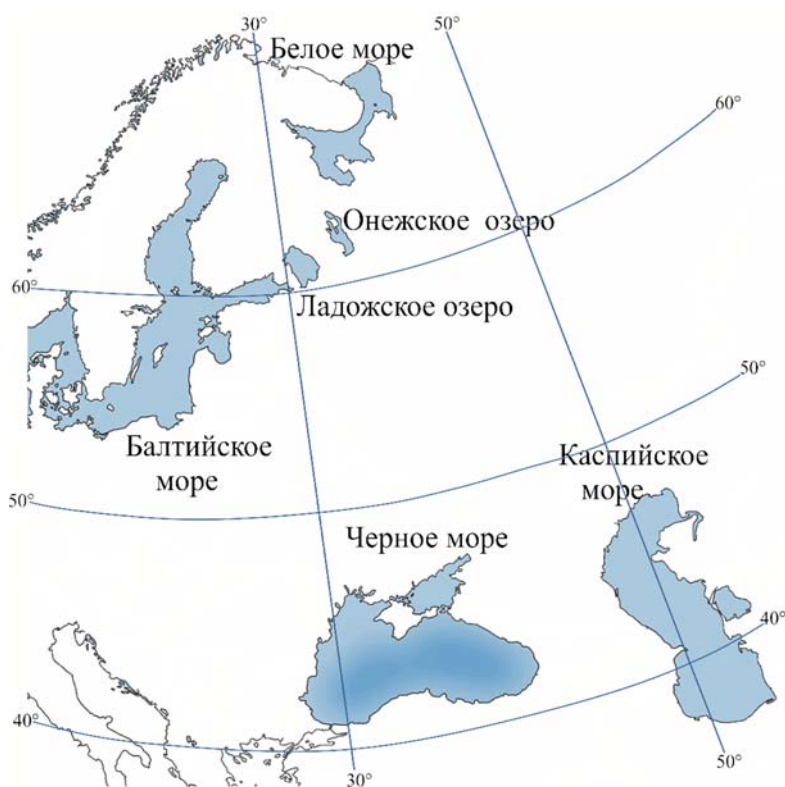


Рис. 1. Расположение водных объектов на европейской части России
Fig. 1. Location of water bodies in the European part of Russia

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики акваторий [Атлас..., 1980]

Table 1. Basic morphometric characteristics of water areas [Atlas..., 1980]

Озеро (море) Lake (sea)	Площадь поверхности, тыс. км ² Surface area, thous. km ²	Средняя/наибольшая глубина, м Average/greatest depth, m	Наибольшая длина/ширина, км Longest length/width, km
Черное море Black Sea	422	1315/2210	1200/600
Балтийское море Baltic Sea	419	50/470	1500/650
Каспийское море Caspian Sea	374	209/1025	1200/320
Белое море White Sea	90	67/350	600/450
Ладожское озеро Lake Ladoga	17,7	48*/230	219/125
Онежское озеро Lake Onego	9,7	29/127	248/92

Примечание. *[Современное..., 2021].

Note. *[Current..., 2021].

части России, включая Онежское озеро, Белое, Балтийское, Черное и Каспийское моря (рис. 1), только для Балтийского и Черного морей [Afanasyev et al., 2002; Gade et al., 2012] проводились исследования с использованием метода МСС.

Акватории расположены в разных широтных зонах от 40 до 65° с. ш., кроме этого, значительно отличаются друг от друга своими размерами (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что площадь наименьшей из рассматриваемых акваторий – Онежского озера более чем в 40 раз меньше самой большой – Черного моря, в то же время Черное море расположено южнее Белого примерно на 2000 км. Ветровая ситуация, время возникновения стратификации, величины горизонтальных температурных градиентов, возникновение апвеллингов (даунвеллингов) и вертикальных движений в слое скачка будут существенно отличаться на разных акваториях.

Поверхностный слой воды практически непрерывно находится под воздействием ветра, причем его направление и сила для различных акваторий может иметь значительные отличия. Результатом этого воздействия является движение поверхностного слоя воды, которое за счет трения передается более глубоким слоям. В период открытой воды с помощью метода МСС проведены расчеты пространственного распределения поверхностных течений на акваториях, как представлено в табл. 2, при различном направлении и скорости ветра на метеорологических станциях вокруг них, а по их результатам построены схемы переноса поверхностного слоя.

Для дат, указанных в табл. 2, выбраны 12 сеансов с температурой поверхности [NASA...] названных акваторий и обработаны по усовершенствованной методике, представленной выше. Затем для каждой акватории рассчитаны поверхностные течения методом МСС.

Ладожское озеро

В Ладожском озере к концу июля, как следует из рис. 2, температура воды на поверхности в центре озера составляет 17–18 °С. Наблюдается устойчивая стратификация, слой скачка находится в этот период на глубине около 10 м [Науменко, Гузиватый, 2022]. Под действием северо-восточного ветра у восточного берега начинает формироваться апвеллинг с температурами 14–15 °С, на севере озера, у Валаама и в районе Приозерска, вероятно, в штилевых условиях сформировались не-

большие участки с температурами до 20 °С. В приустьевых участках Свири, Волхова и Вуоксы наблюдаются области теплых вод с температурами до 20 °С. Циркуляция охватывает юг и центральную часть озера, как следует из табл. 2, скорости течений составляют 0,3 м/с. Мода и медиана соответствуют друг другу, и вероятность появления модального значения не превышает 30 %. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Ладожского озера в период открытой воды [Филатов, 1991].

Онежское озеро

В Онежском озере к середине июня наблюдается устойчивая стратификация по всей акватории, что представлено на рис. 3. По берегам в заливах и губах температура поверхности может достигать 16 °С, в центре – 7–9 °С, а температурные градиенты в этот период в отдельных частях акватории достигают 7 °С на 20 км. Ветровая ситуация над Онежским озером по данным метеостанций Петрозаводск и Медвежьегорск характеризуется преобладанием северных, северо-западных составляющих со скоростями до 5 м/с. Такой однородный воздушный поток в Онежском озере формирует поверхностные течения со средней скоростью 0,2 м/сек, имеющие направление с северо-запада на юго-восток и захватывающие практически всю центральную часть. Очевидно, что существует соответствие между модой и медианой скоростей течений на поверхности, вероятность появления модального значения, так же как и на Ладожском озере, составляет 30 %. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Онежского озера в период открытой воды [Филатов, 1991].

Белое море

Площадь акватории Белого моря в 5 раз больше площади Ладожского озера (рис. 1). Размеры губ и заливов Белого моря соизмеримы с размерами Ладожского озера. В выбранную дату 16 июня температура поверхности в Горле Белого моря равна 6 °С, в Двинской губе – 16 °С. В Кандалакшском заливе, Двинской и Онежской губе хорошо выделяются температурные неоднородности на поверхности воды. В Двинской губе из-за впадения в нее Северной Двины, а в Онежской губе – реки Онега. В этот период по м/с Архангельск наблюдался ветер северных, северо-западных направлений силой 2–4 м/сек.

Таблица 2. Используемая ИК-космическая информация и статистические характеристики рассчитанных течений

Table 2. Applied space infrared information and statistical characteristics of the calculated currents

Озеро (море) Lake (sea)	Дата и время 1-го снимка Date and time of the 1 st image	Дата и время 2-го снимка Date and time of the 2 nd image	Время между снимками, мин Time between images, min	Количество значимых векторов Number of significant vectors	Медиана скорости течений, м/с Median current velocity, m/s	Мода, м/с / частота, % Mode, m/s /frequency, %	Стандартное отклонение, м/с Standard deviation, m/s
Ладожское озеро Lake Ladoga	23/07/2019 08:55	23/07/2019 10:45	110	1325	0,3	0,3/26,5	0,09
Онежское озеро Lake Onego	16/06/2019 19:55	16/06/2019 23:55	240	553	0,2	0,2/30,3	0,06
Белое море White Sea	16/06/2019 19:55	16/06/2019 23:55	240	2103	0,2	0,1/20,9	0,09
Балтийское море Baltic Sea	17/06/2019 20:35	18/06/2019 00:40	245	38501	0,1	0,1/17,3	0,07
Черное море Black Sea	03/05/2019 19:30	03/05/2019 23:35	250	5761	0,2	0,1/16,0	0,13
Каспийское море Caspian Sea	06/05/2019 18:19	06/05/2019 22:30	252	9710	0,1	0,1/24,6	0,1

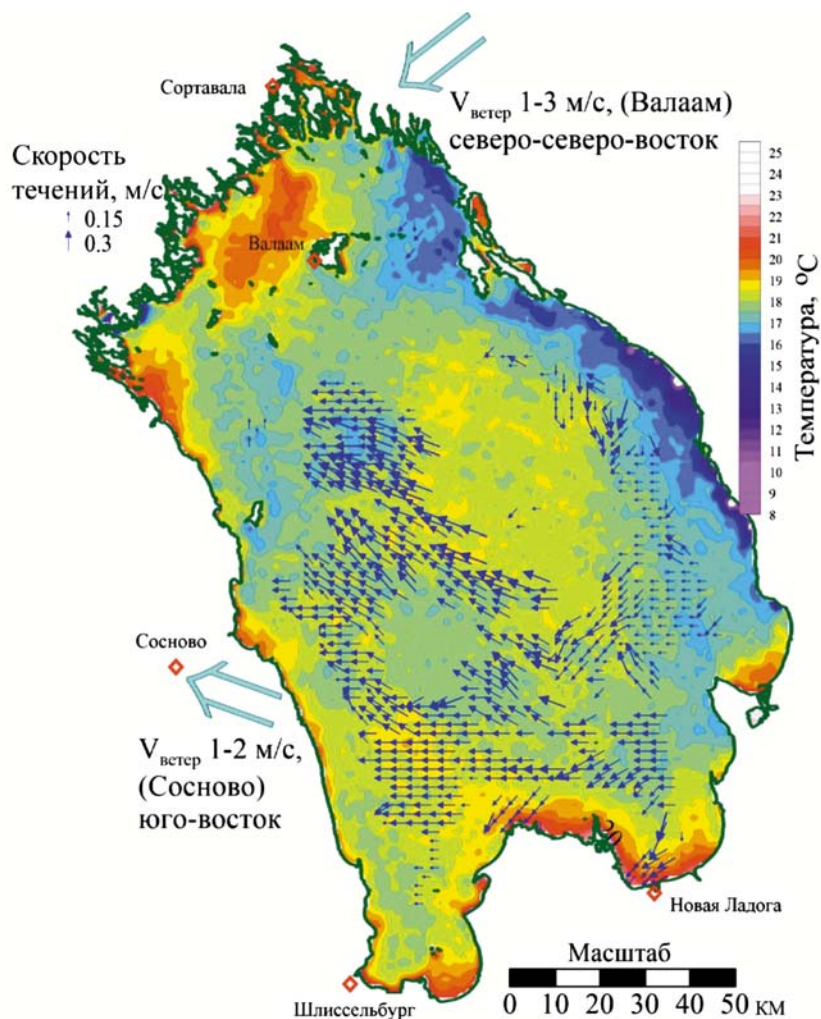


Рис. 2. Рассчитанные течения на поверхности Ладожского озера 23 июля 2019 года

Fig. 2. Calculated currents at the surface of Lake Ladoga on July 23, 2019

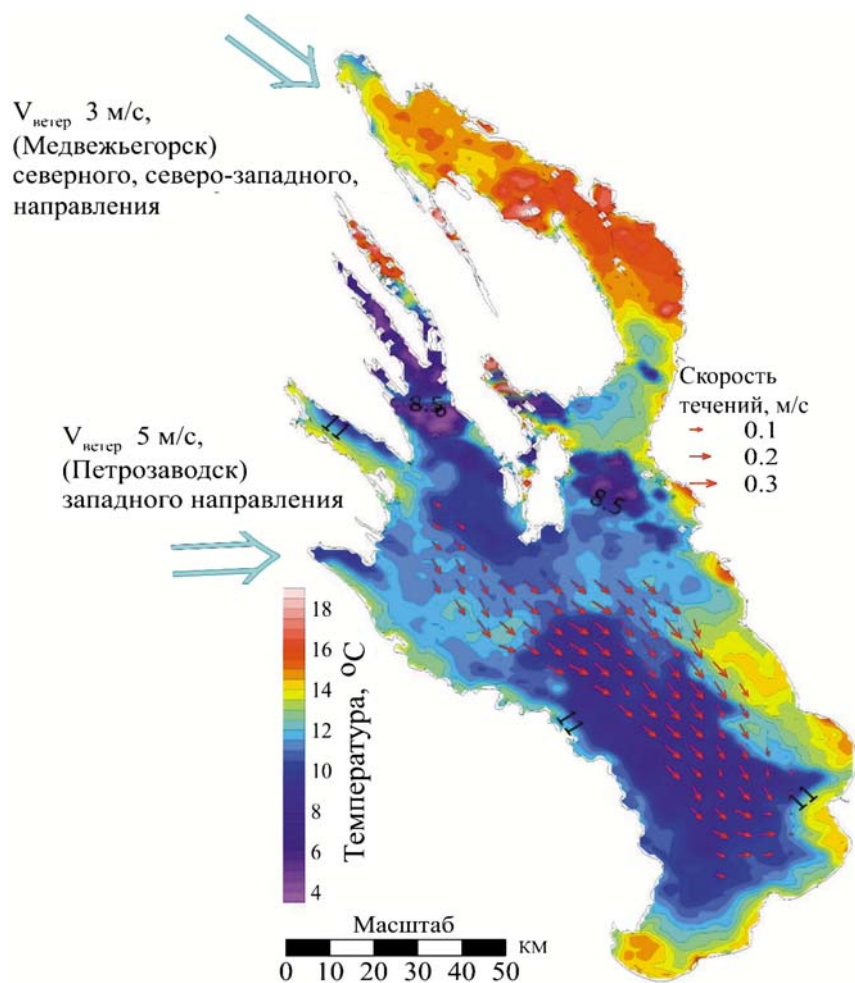


Рис. 3. Рассчитанные течения на поверхности Онежского озера 16 июня 2019 года
 Fig. 3. Calculated currents at the surface of Lake Onego on June 16, 2019

На рис. 4 представлена система течений на поверхности Белого моря. В целом она не противоречит ветру, наблюдавшемуся в этот период над морем, и горизонтальным температурным градиентам на поверхности [Доронин, 1986; Толстиков, 2016]. Как следует из табл. 2, при указанном ветре скорости течений на поверхности меньше, чем на Ладожском и Онежском озерах, и меньше вероятность появления модального значения.

Балтийское море

Балтийское море протянулось с севера на юг на 1300 и с запада на восток более чем на 1000 км. Большое количество заливов, островов, бухт, близость берега создают достаточно разнообразное поле ветра над Балтийским морем, и, как следствие, пространственно-временные вариации мезо- и сино-

тических масштабов системы течений для каждого района будут иметь свои особенности [Доронин, 1986; Динамика..., 2007]. Температура на поверхности Балтийского моря для разных районов может значительно отличаться – например, в Ботническом и Гданьском заливе. На м/с Хельсинки и Таллин 17 июля и в предшествующие сутки ветер менял направление с северо-запада на западо-юго-запад. К моменту спутниковой съемки наблюдался ветер западо-юго-западного направления со скоростью 2–4 м/сек.

Представленная на рис. 5 система течений на поверхности Балтийского моря указывает, что для каждого района существует своя система циркуляций, с наиболее вероятными скоростями течений, как видно из табл. 2, около 0,1 м/с. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Балтийского моря в период открытой воды [Динамика..., 2007].

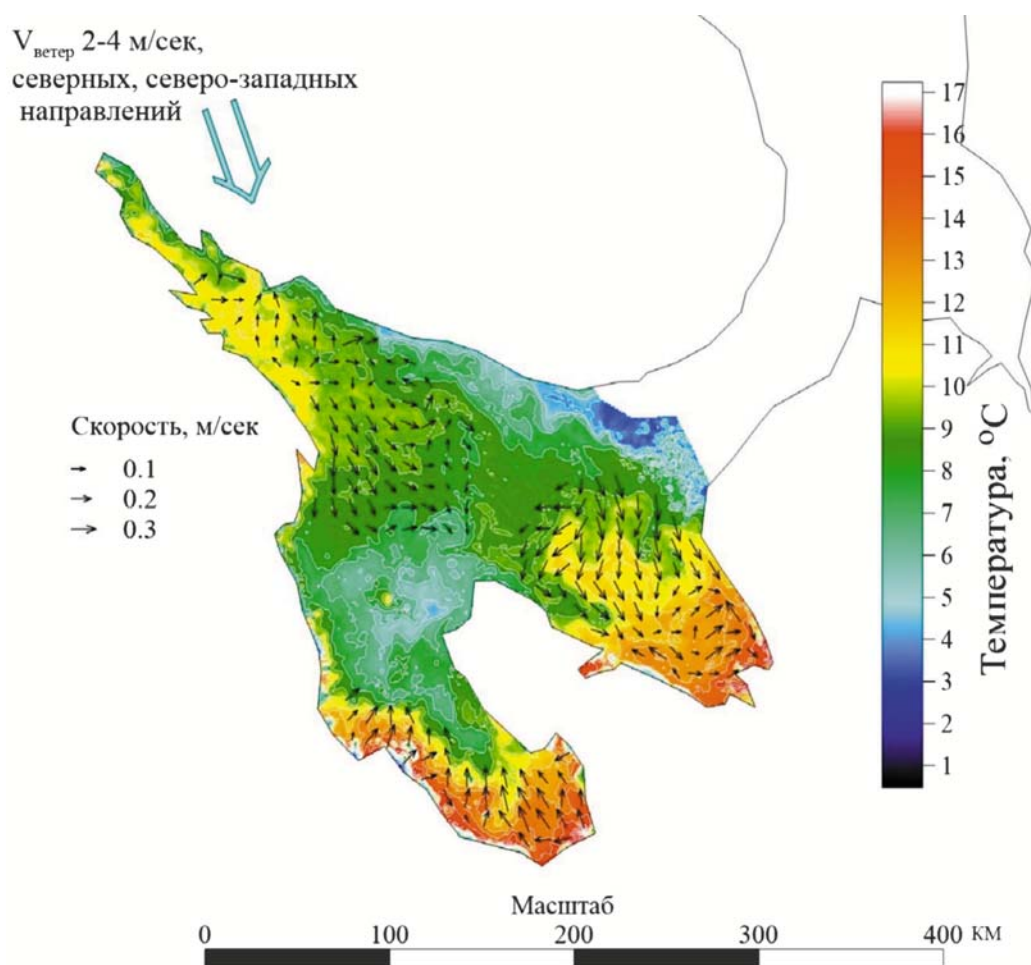


Рис. 4. Рассчитанные течения на поверхности Белого моря 16 июня 2019 года
 Fig. 4. Calculated currents at the surface of the White Sea on June 16, 2019

Черное море

3 мая 2019 года в Черном море, как представлено на рис. 6, температура поверхности практически по всей акватории составляла 12–14 °С. На ИК-снимке в этот период можно выделить температурные особенности в виде грибовидных структур, например на юго-западе от Крымского полуострова, которые по размерам сопоставимы с Ладожским озером.

Анализ ветра, по данным метеорологических станций, расположенных в Одессе, Бургасе, Новороссийске, Батуми, показывает (рис. 6) наличие разнонаправленных небольших скоростей ветра, до 3 м/с. Это формирует неравномерное поле ветра, которое воздействует на различные части морской акватории и генерирует разнонаправленные поверхностные течения, как видно на рис. 6, со скоростями около 0,1 м/с. Вероятность появления этих скоростей составляет 16 %. Полученная структура поверх-

ностных течений соответствует результатам, приведенным в монографии [Комплексные..., 2002].

Каспийское море

6 мая 2019 года в Каспийском море (рис. 7) поверхность воды в отдельных районах прогрелась от 9 до 18 °С. В момент принятия ИК-информации у западного берега центральной части моря образовался обширный апвеллинг.

Анализ ветра по трем метеостанциям (Баку, Актау, Лагань), расположенным на значительном расстоянии друг от друга, свидетельствует о большой пространственной неоднородности ветрового режима над акваторией Каспийского моря. Это приводит к возникновению разнонаправленных течений, вихревых структур на поверхности со скоростями около 0,1 м/с. Заметим, что это не противоречит результатам, приведенным в [Каспийское..., 2007].

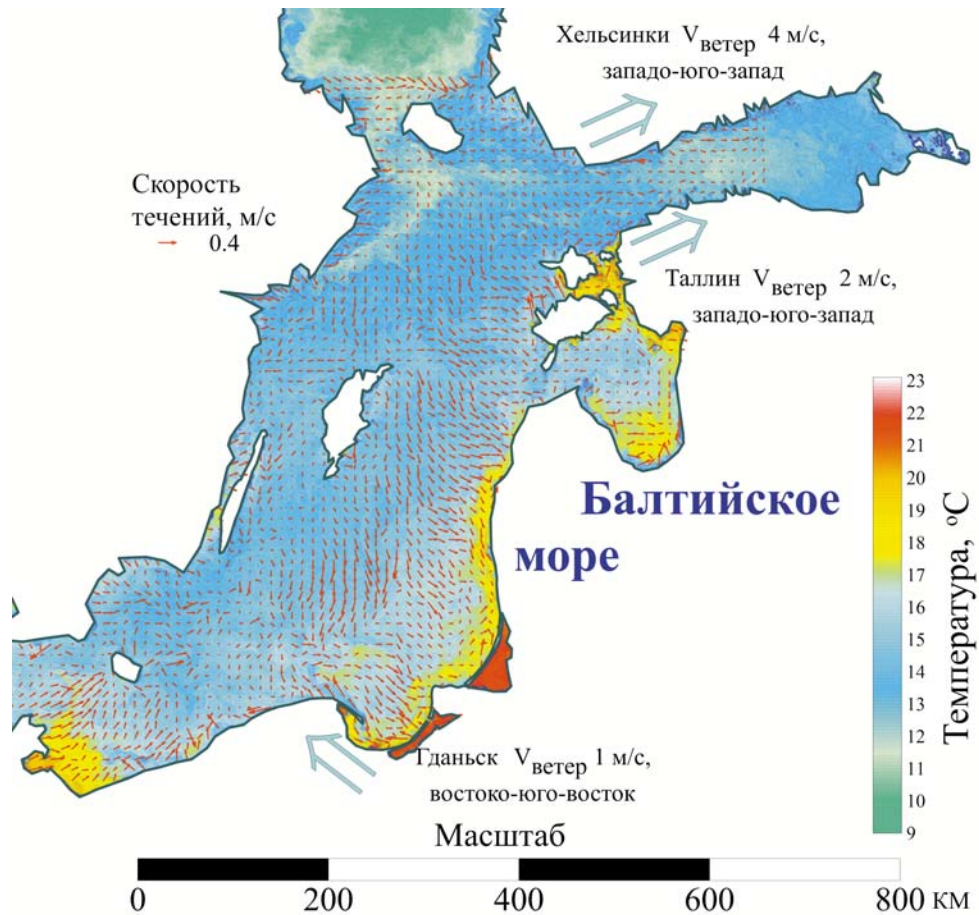


Рис. 5. Рассчитанные течения на поверхности Балтийского моря в ночь с 17 на 18 июня 2019 года

Fig. 5. Calculated currents at the surface of the Baltic Sea on the night of June 17 –18, 2019

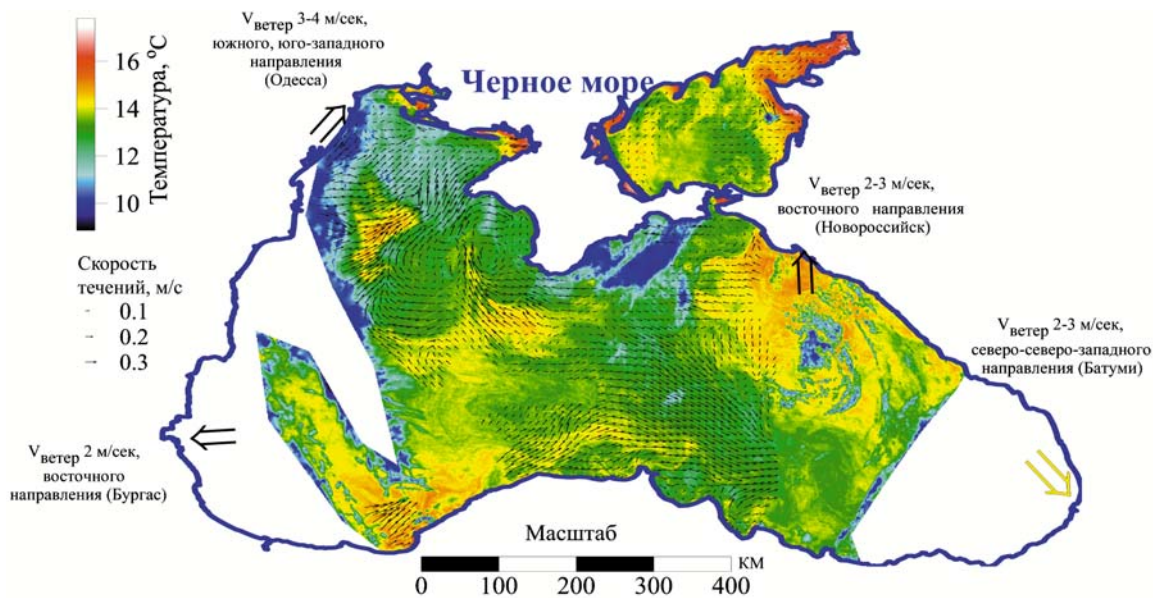


Рис. 6. Рассчитанные течения на поверхности Черного моря 3 мая 2019 года

Fig. 6. Calculated currents at the surface of the Black Sea on May 3, 2019

Выводы

Пространственное распределение течений мезо- и синоптических масштабов на поверхности крупных акваторий представляет сочетание экмановского переноса и геострофических течений, и определяется перенос различных примесей как естественного, так и искусственного происхождения. Метод МСС для оценки системы поверхностных течений на значительных океанских площадях был адаптирован

и усовершенствован для внутренних водоемов, включая Ладожское и Онежское озера. Предложены новые процедуры выбора наиболее информативных космических ИК-съемок для анализа течений. Разработан и апробирован подход по определению меры связности изображений, полученных с космических аппаратов, позволяющий значительно сократить время, затрачиваемое на обработку информации больших объемов. Применение метода МСС для расчета течений в акваториях

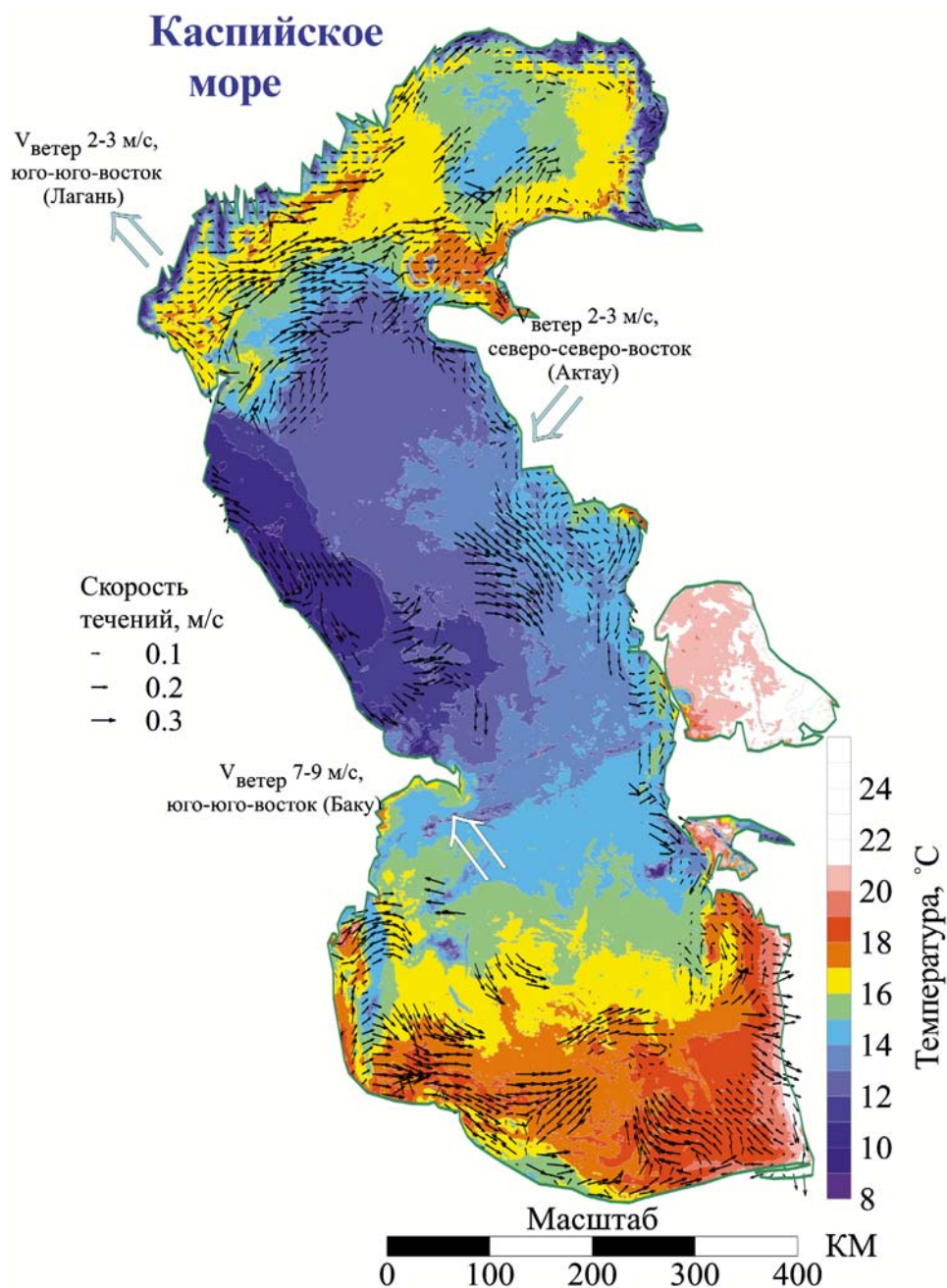


Рис. 7. Рассчитанные течения на поверхности Каспийского моря 6 мая 2019 года
Fig. 7. Calculated currents at the surface of the Caspian Sea on May 6, 2019

различного размера и расположенных на различных широтах, с использованием методических подходов, разработанных на Ладожском озере, показало свою эффективность. Впервые для периода открытой воды рассчитаны поверхностные течения при определенных ветровых ситуациях синоптического и мезомасштаба для Онежского озера, Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей.

В весенний период, когда происходит нагревание и поверхностные пространственные температурные градиенты наиболее выражены, применение метода МСС, вероятно, является наиболее предпочтительным.

Для Онежского озера, Белого и Балтийского морей впервые проведен синхронный расчет системы течений на поверхности (табл. 2). Полученные результаты дают наглядное представление о поверхностной циркуляции различных акваторий за небольшой промежуток времени (16–17 июня 2019 г.).

В заключение следует подчеркнуть, что в шестидесятые годы прошлого века для Ладожского озера был применен динамический метод расчета течений, взятый из океанологии [Охлопкова, 1966]. В настоящее время метод МСС, разработанный для океанских условий, успешно применен для крупных озер и морей, что подтверждает взаимовлияние и общность между методами изучения этих разномасштабных водных объектов [Кондратьев и др., 1986; Kondratyev et al., 1999; Downing, 2014]. Метод МСС безусловно перспективен в условиях отсутствия прямых измерений течений как в крупных озерах, так и в океанах. Использование метода в настоящее время является оптимальной процедурой для верификации системы поверхностных течений, рассчитанных с использованием термогидродинамических моделей.

Литература

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.

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.

Атлас океанов. Термины. Понятия. Справочные таблицы / ГУНИО МО СССР. 1980 г. 156 с.

Гузиватый В. В., Науменко М. А. Оценка течений на поверхности крупного озера с помощью последовательных инфракрасных изображений // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: Труды V Всерос. конф. (г. Владимир, 11–14 октября 2016 г.). М., 2016. С. 113–119.

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

Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов / Под ред. Е. А. Захарчука. СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. 351 с.

Доронин Ю. П. Региональная океанология. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 303 с.

Каспийское море: экстремальные гидрологические события / Ред. М. В. Болгов, Г. Ф. Красножон, А. А. Любушин. М.: Наука, 2007. 381 с.

Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М.: Наука, 2002. 476 с.

Кондратьев К. Я., Адаменко В. Н., Власов В. П., Дружинин Г. В., Крейман К. Д., Поздняков Д. В., Румянцев В. Б., Тихомиров А. И. Большое озеро как имитационная модель океана. Л.: Наука, 1986. 63 с.

Малинина Т. И., Филатова И. В., Филатов Н. Н. Изменчивость водного баланса и моделирование течений Ладожского озера // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водоемах: Мат-лы школы-семинара. Л.: Наука, 1984. С. 191–197.

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 1. С. 52–62. doi: 10.31857/S0002351522010102

Науменко М. А., Каретников С. Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // ДАН. 2002. Т. 386, № 2. С. 250–253.

Охлопкова А. Н. Течения Ладожского озера // Труды Лаб. озероведения ЛГУ. 1966. Т. 20. С. 265–278.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021. 640 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3

Толстиков А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: Геос, 2016. 212 с.

Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 191 с.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

Afanashev 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. Vol. 107, no. 8. P. 3098–4003.

Doranzo B., Taddei S., Brandini C., Fattorini M. Extensive analysis of potentialities and limitations of a maxi-

imum cross-correlation technique for surface circulation by using realistic ocean model simulations // *Ocean Dynamics*. 2015. No. 65. P. 1183–1198. doi: 10.1007/s10236-015-0859-1

Downing J. A. Limnology and oceanography: two estranged twins reuniting by global change // *Inland Waters*. 2014. No. 4. P. 215–232. doi: 10.5268/IW-4.2.753

Emery W. J., Fowler C., Clayson C. A. Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1992. Vol. 9. P. 286–304.

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. Vol. 91, no. 11. P. 12865–12878.

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. Vol. 33. P. 3122–3146. doi: 10.1080/01431161.2011.628711

Haralick R. M., Shapiro L. G. *Computer and robot vision*. Vol. 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. Vol. 94, no. 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. Vol. 97, no. 6. P. 9653–9668.

Kondratyev K. Ya., Filatov N. N. *Limnology and remote sensing: A contemporary approach*. London: Springer Science Business Media, 1999. 406 p.

Lewis J. P. Fast normalized cross-correlation // *Industrial Light & Magic*. 1995. No. 10.

NASA Ocean Color [Электронный ресурс]. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.12.2023).

Naumenko M. A. Some aspects of the thermal regime of large lakes: Lake Ladoga and Lake Onega // *Water Pollut. Res. J. Can.* 1994. Vol. 29, no. 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. Ocean. Tech.* 2008. Vol. 25, no. 2. P. 271–285.

Romeiser R., Suchandt S., Runge H., Steinbrecher U., Grunler S. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields // *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 2010. No. 48. P. 820–829.

SeaDAS – Sea WIFS Data Analysis System [Электронный ресурс]. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.12.2023).

Steissberg T. E., Simon J. H., Geoffrey S. S. Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L11402. doi: 10.1029/2005GL022912

Wunsch C. Observing ocean circulation from space // *Oceanus*. 1992. Vol. 35, no. 2. P. 9–17.

Zavialov P. O., Grigorieva J. V., Moeller Jr. O., Kostianoy A. G., Gregoirev M. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. 10. P. 3160–3178.

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;107(8):3098–4003.

Aleksanin A. I., Aleksanina M. G., Karnatsky A. Yu. Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2013;10(2):131–142. (In Russ.)

Andreev O. A., Vorob'eva L. V. Wind and runoff circulation of Lake Ladoga (numerical experiments). *Modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gidrologicheskikh protsessov v ozerakh = Modeling and experimental studies of hydrological processes in lakes*. Leningrad; 1986. P. 17–21. (In Russ.)

Astrakhantsev G. P., Egorova N. B., Oganessian L. A., Rukhovets L. A. Three-dimensional nonstationary model of Lake Ladoga. *Proceedings of GGI*. 1988;321:32–40. (In Russ.)

Atlas of oceans. Terms. Concepts. Reference tables. GUNIO of the USSR Ministry of Defense. 1980. 156 p. (In Russ.)

Bolgov M. V., Krasnozhan G. F., Lyubushin A. A. (eds.). Caspian Sea: extreme hydrological events. Moscow: Nauka; 2007. 381 p. (In Russ.)

Doronin Yu. P. *Regional oceanology*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 303 p. (In Russ.)

Doronzo B., Taddei S., Brandini C., Fattorini M. Extensive analysis of potentialities and limitations of a maximum cross-correlation technique for surface circulation by using realistic ocean model simulations. *Ocean Dynamics*. 2015;65:1183–1198. doi: 10.1007/s10236-015-0859-1

Downing J. A. Limnology and oceanography: two estranged twins reuniting by global change. *Inland Waters*. 2014;4:215–232. doi: 10.5268/IW-4.2.753

Emery W. J., Fowler C., Clayson C. A. Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1992;9:286–304.

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;91(11): 12865–12878.

Filatov N. N. *Hydrodynamics of lakes*. St. Petersburg: Nauka; 1991. 191 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). *Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 255 p. (In Russ.)

Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data. *Inter. J. Remote Sens.* 2012;33:3122–3146. doi: 10.1080/01431161.2011.628711

Guzivaty V. V., Naumenko M. A. Assessment of currents on the surface of a large lake using sequential infrared images. *Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii: Trudy V Vseros. konf. (g. Vladimir, 11–14 okt. 2016 g.) = Ice and thermal processes*

on water bodies of Russia: Proceedings of V All-Russian conference (Oct. 11–14, 2016, Vladimir). Moscow; 2016. P. 113–119. (In Russ.)

Guzivaty V. V., Naumenko M. A., Rumyantsev V. A. Determining the velocity of the upper layer of Lake Ladoga by means of maximum cross correlation (MCC). *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2020;56:1678–1686. doi: 10.1134/S0001433820120415

Haralick R. M., Shapiro L. G. *Computer and robot vision*. Vol. 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;94(12):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;97(6):9653–9668.

Kondratyev K. Ya., Filatov N. N. *Limnology and remote sensing: A contemporary approach*. London: Springer Science Business Media; 1999. 406 p.

Kondratyev K. Ya., Adamenko V. N., Vlasov V. P., Druzhinin G. V., Kreiman K. D., Pozdnyakov D. V., Rumyantsev V. B., Tikhomirov A. I. A large lake as a simulation model of the ocean. Leningrad: Nauka; 1986. 63 p. (In Russ.)

Kondratyev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). *Modern state and problems of anthropogenic transformation of the Ladoga Lake ecosystem under the conditions of changing climate*. Moscow: RAS; 2021. 640 p. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3 (In Russ.)

Lewis J. P. Fast normalized cross-correlation. *Industrial Light & Magic*. 1995;10.

Malinina T. I. I., Filatova I. V., Filatov N. N. Variability of water balance and modeling of currents of Lake Ladoga. *Vzaimodeistvie mezhdru vodoi i sedimentami v ozerakh i vodoemakh: Mat-ly shkoly-seminara = Interaction between water and sediments in lakes and reservoirs: Proceedings of the school-seminar*. Leningrad: Nauka; 1984. P. 191–197. (In Russ.)

NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.12.2023).

Naumenko M. A. Some aspects of the thermal regime of large lakes: Lake Ladoga and Lake Onega. *Water Pollut. Res. J. Can.* 1994;29(2/3):423–439.

Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Methodical approaches and results of the analysis of climatic seasonal course of parameters of stable stratification of a dimictic lake (by the example of the central part of Lake Ladoga). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(1):52–62. doi: 10.31857/S0002351522010102 (In Russ.)

Naumenko M. A., Karetnikov S. G. Seasonal evolution of the spatial distribution of water surface temperature of Lake Ladoga in connection with its morphometry. *Dokl. Earth Sci.* 2002;386(2):250–253. (In Russ.)

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;25(2):271–285.

Okhlopkova A. N. Currents of Lake Ladoga. *Trudy Lab. ozerovedeniya LGU = Proceedings of the Laboratory of Lake Research of the Leningrad State University*. 1966;20:265–278. (In Russ.)

Romeiser R., Suchandt S., Runge H., Steinbrecher U., Grunler S. First analysis of Terra SAR-X along-track In SAR-derived current fields. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010;48:820–829.

SeaDAS – Sea WiFS Data Analysis System. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.12.2023).

Steissberg T. E., Simon J. H., Geoffrey S. S. Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery. *Geophys. Res. Lett.* 2005;32:L11402. doi: 10.1029/2005GL022912

Tolstikov A. V. Variability of the White Sea surface layer temperature. Moscow: GEOS; 2016. 212 p. (In Russ.)

Wunsch C. Observing ocean circulation from space. *Oceanus*. 1992;35(2):9–17.

Zakharchuk E. A. (ed.). *Baltic Sea water dynamics in the synoptic range of spatial and temporal scales*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 2007. 351 p. (In Russ.)

Zatsepin A. G., Flint M. V. (ed.). *Integrated studies of the northeastern part of the Black Sea*. Moscow: Nauka; 2002. 476 p. (In Russ.)

Zavialov P. O., Grigorieva J. V., Moeller Jr. O., Kostinoy A. G., Gregoirev M. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique. *J. Geophys. Res.* 2002;107(10):3160–3178.

Поступила в редакцию / received: 11.12.2023; принята к публикации / accepted: 01.02.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Гузиватый Вадим Викторович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии

e-mail: guzivaty@gmail.com

Науменко Михаил Арсеньевич

д-р геогр. наук, профессор, руководитель лаборатории географии и гидрологии

e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Guzivaty, Vadim

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Naumenko, Mikhail

Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Head of Laboratory