

УДК 556.55

© А. В. Зимин^{1,2*}, О. А. Атаджанова¹, А. А. Коник¹, А. В. Исаев¹, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва

²Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
185030, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50

*zimin2@mail.ru

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-1 С ЯНВАРЯ ПО ДЕКАБРЬ 2016–2022 гг.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024, после доработки 06.10.2024, принята в печать 02.11.2024

Аннотация

В работе представлены результаты анализа многолетнего массива наблюдений за пространственно-временной изменчивостью характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Ладожского озера по радиолокационным изображениям. В качестве исходных данных использовались более 3500 высокоразрешающих спутниковых снимков Sentinel-1A/B за период с января 2016 по декабрь 2022 г. Представлены обобщенные карты повторяемости субмезомасштабных структур на акватории озера за год и по сезонам. Получены среднегодовые и сезонные оценки изменчивости средних диаметров вихрей в целом и с учетом типа вращения. Показано, что субмезомасштабные вихри являются распространенным явлением на всей акватории озера в период развития прямой термической стратификации и присутствия приповерхностного пикноклина. Чаще всего регистрировались циклонические структуры размерами до 3 км, что не превышает оценок среднего радиуса деформации Россби для Ладожского озера. Вихри чаще всего отмечались к северу от о-ва Валаам. Значительной межгодовой изменчивости в их характеристиках не прослеживалось, они были близки к средним многолетним. Выявлено наличие выраженной внутригодовой изменчивости характеристик субмезомасштабных структур как в частоте и местах встречаемости, так и в меньшей степени в их размерах. Установлено, что наиболее часто вихри наблюдались в районах с глубинами 50–100 м, вблизи областей фронтальных зон различного генезиса. На отдельных примерах показано, что неустойчивость в области фронтальных зон в Ладожском озере может быть одной из доминирующих причин появления групп малых вихрей в условиях, когда топографические эффекты и влияние ветра не должны быть существенными.

Ключевые слова: субмезомасштаб, вихри, мониторинг, спутниковые радиолокационные изображения, статистические характеристики вихревых образований, Ладожское озеро

UDC 556.55

© А. В. Зимин^{1,2*}, О. А. Atadzhanova¹, А. А. Konik¹, А. В. Isaev¹, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 50 A. Nevskogo Pr.,
Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030, Russia

*zimin2@mail.ru

SUBMESOSCALE EDDIES IN LAKE LADOGA BASED ON SENTINEL-1 RADAR IMAGES FROM JANUARY TO DECEMBER 2016–2022

Received 16.09.2024, Revised 06.10.2024, Accepted 02.11.2024

Abstract

This study presents the results of the analysis of a long-term dataset of observations on the spatial-temporal variability of submesoscale eddy characteristics in Lake Ladoga using radar imagery. The initial data consisted of more than 3500 high-resolution Sentinel-1A/B satellite images for the period from January 2016 to December 2022. Generalized maps of the occurrence

Ссылка для цитирования: Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Исаев А.В. Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1 с января по декабрь 2016–2022 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 43–54. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3

For citation: Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Konik A.A., Isaev A.V. Submesoscale Eddies in Lake Ladoga Based on Sentinel-1 Radar Images from January to December 2016–2022. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):43–54. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3

of submesoscale structures on the lake's waters for the year and by seasons are presented. Average annual and seasonal estimates of the variability of the mean diameters of eddies with different type of rotation were obtained. It was shown that submesoscale structures are a common phenomenon throughout the lake during the period of direct thermal stratification and the presence of a near-surface pycnocline. Cyclonic structures with sizes up to 3 km were most frequently registered, which does not exceed the estimates of the average Rossby deformation radius for Lake Ladoga. Eddies were most often observed north of Valaam Island. No significant interannual variability in their characteristics was found; they were close to the average multi-year values. A pronounced intrayear variability in the characteristics of submesoscale structures was revealed, both in frequency and locations, and to a lesser extent in their sizes. It was established that eddies were most frequently observed in areas with depths of 50–100 meters, near frontal zones of different genesis. In specific cases, the instability in frontal zones in Lake Ladoga appears to be a dominant factor in the formation of small eddy groups, especially in the absence of significant topographic effects or wind influence.

Keywords: submesoscale, eddies, monitoring, satellite radar images, statistical characteristics of eddy formations, Lake Ladoga

1. Введение

В крупных озерах, имеющих характерный размер порядка десятков и сотен километров, т. е. больше оценок радиуса деформации Россби, круговороты масштаба бассейна (мезомасштабные) преобладают в циркуляции и играют ключевую роль в горизонтальном и вертикальном распределении физических, химических и биологических параметров по всему водоему. Они формируются под влиянием ветра, термодинамического обмена, стока рек, а модифицируются силой Кориолиса, особенностями рельефа дна и положением берегов [1, 2].

Кроме мезомасштабной циркуляции в озерах часто возникают вихри меньшего масштаба (от сотен метров до единиц километров), влияние силы Кориолиса на которые не является полностью определяющим [3]. Они относятся к субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей [4]. Вихревые структуры данного размера не описываются целиком положениями квазигеострофического приближения и в то же время не являются в полной мере изотропно трехмерными, негидростатическими процессами. Они имеют характерное время существования от часов до суток. Считается, что субмезомасштабные вихри характеризуются значительной вертикальной скоростью, поэтому играют важную роль в особенностях локального вертикального и горизонтального перемешивания [4, 5]. Анализ спутниковых изображений с высоким пространственным разрешением (оптические снимки и радиолокационные изображения (РЛИ)) позволил сделать очевидным вывод о распространённости малых (субмезомасштабных) структур во многих озерах: озеро Верхнее (Северная Америка) [6], Скадарское озеро в Черногории/Албании [7], Ладожское и Онежское озера в России [8–10], Женевское озеро в Швейцарии [11], Севан в Армении [12]. Но стоит отметить, что в большинстве случаев представленные исследования основываются на рассмотрении незначительного числа проявлений вихревых структур.

Считается, что в районах частой повторяемости субмезомасштабные структуры оказывают влияние не только на динамику вод, но и на биогеохимические процессы и, соответственно, биологическую продуктивность [5] как в морях, так и в крупных водоемах. В результате информация о районах частой регистрации субмезомасштабных вихрей, их сезонной и межгодовой изменчивости важна для углубления понимания динамических и биологических процессов, протекающих в озерах. Этот вопрос весьма актуален, так как изменения климата и возрастающая антропогенная нагрузка может привести к эвтрофикации многих озёр России [1], в том числе, Ладожского озера. Значение Ладожского озера определяется тем, что оно является основным источником водоснабжения одного из крупнейших городов России — Санкт-Петербурга. Спрогнозировать развитие процессов в Ладожском озере можно на основе вихреразрешающих гидродинамических моделей высокого пространственного разрешения [13]. Однако их развитие невозможно без наличия обеспеченной многолетней информационной базы о проявлениях субмезомасштабных вихрей в течение всего года на акватории озера.

Одним из наиболее масштабных по использованному материалу для исследований проявлений субмезомасштабных вихрей в Ладожском озере является работа [9], в которой на основе анализа 1023 РЛИ, покрывающих акваторию Ладожского озера, за май-октябрь 2019–2022 гг. было детектировано 496 вихревых структур. Среди них отмечались как отдельные вихри, так и дипольные структуры, а также вихревые дорожки. Средний диаметр вихрей составил 2 км, что не превышает бароклинного радиуса Россби, размер которого в Ладожском озере колеблется от 2 до 5 км [14]. Циклонический тип вращения имели 80 % структур. Чаще всего вихри регистрировались в озере в период развития устойчивой стратификации. Значительное число вихрей, отмечаемое во время активного движения термобара в мае-июле, позволило обосновать

предположение о том, что они оказывают значительное влияние на обмен между теплоактивной и тепло-инертной областями озера даже в условиях слабых ветров. Однако данное исследование не охватывает холодную часть года, а полученные статистические оценки среднемесячной изменчивости основываются на сравнительно небольших статистических выборках и не могут служить достоверным основанием для совершенствования существующих гидродинамических моделей озера.

Поэтому цель работы — представление первых результатов обобщающего анализа изменчивости характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Ладожского озера по радиолокационным изображениям за период с января по декабрь 2016–2022 гг.

2. Материалы и методы

Для исследования поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур на акватории Ладожского озера использовались спутниковые данные радиолокаторов с синтезированной апертурой со спутников Sentinel-1 A/B. Всего с января по декабрь 2016–2022 гг. было проанализировано 3552 РЛИ в С-диапазоне и режимах съемки Interferometric Wide (IW) с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км и Extra-Wide Swath (EW) с разрешением 40 м и шириной полосы обзора 400 км. Распределение изображений по акватории за весь рассматриваемый период представлено на рис. 1, а. Максимальное покрытие отмечается в полосе в центральной части бассейна с количеством от 1500 до 1700 изображений. Меньше всего покрыта область восточной части озера, на весь период которого приходится не более 800 изображений. В среднем за год на акваторию озера приходилось 507 снимков. Наименее обеспеченными отмечаются 2016 и 2022 гг., когда число изображений составило около 300 за каждый год. С 2017 по 2021 на каждый год пришлось почти в два раза больше изображений. В месяц в среднем количество спутниковых изображений составило 296 шт. Наименее обеспеченным месяцем является июнь — всего 264 РЛИ, в то время как максимум РЛИ приходится на декабрь — 340 шт.

Регистрация вихрей на РЛИ выполнялась на основе метода, подробно представленного в работах [15, 16]. В программном обеспечении SNAP начальные изображения были откалиброваны и сглажены для уменьшения шумов с помощью фильтра Ли [17]. Затем на каждом отдельном РЛИ (рис. 1, б) вручную находились закрученные в дуги темные контрастные полосы (относительно фона), которые образовались

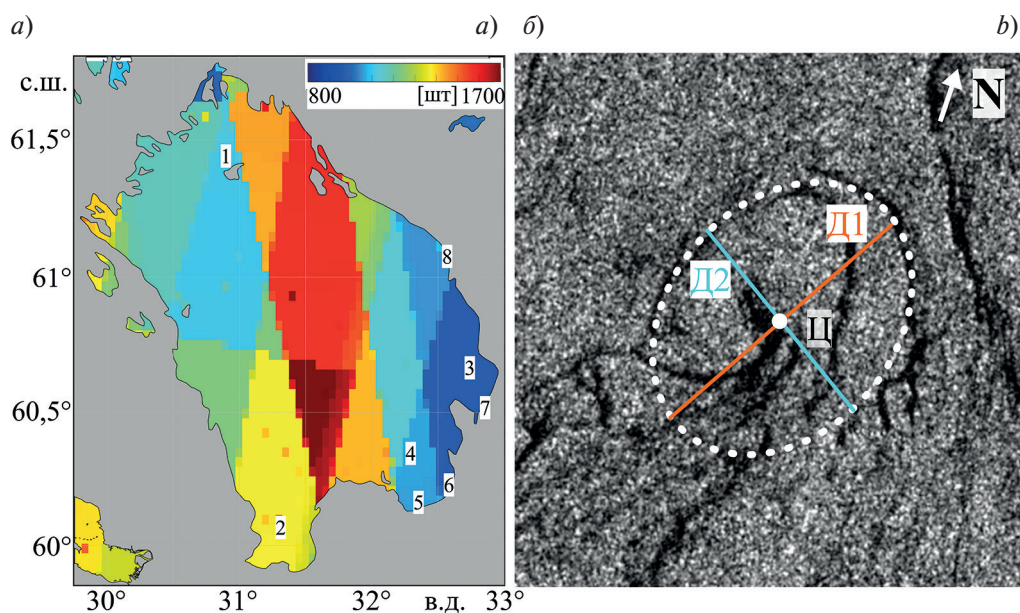


Рис. 1. Карта покрытия РЛИ (а) и фрагмент РЛИ Sentinel-1 от 07.08.2019 15:24 UTC (б) с проявлением вихря и иллюстрацией методики. Цифрами на а обозначены: 1 — остров Валаам, 2 — бухта Петрокрепость, 3 — Свирская губа, 4 — Волховская губа, 5 — устье реки Волхов, 6 — устье реки Сясь, 7 — устье реки Свирь, 8 — устье реки Олонка

Fig. 1. Radar coverage map (a) and a fragment of Sentinel-1 radar image from 07.08.2019 15:24 UTC (b) with manifestation of eddy and an illustration of the methodology. The numbers in a indicate: 1 — Valaam Island, 2 — Petrokrepost Bay, 3 — Svirskaya Bay, 4 — Volkhov Bay, 5 — mouth of the Volkhov River, 6 — mouth of the Syas River, 7 — mouth of the Svir River, 8 — mouth of the Olonka River

за счет накопления поверхностных пленок в областях конвергенции поверхностных течений [18, 19]. Если данные проявления можно было вписать в эллипс, то его принимали за проявление вихревой структуры. Центр выделенной на радиолокационном изображении спирали принимался за центр вихревой структуры («Ц» на рис. 1, б). Тип закрутки вихревой структуры (циклонические — Сп и антициклонические — Ас) определялся на изображении визуально по направлению закрутки спирали, а средний диаметр рассчитывался в среде MathWorks ©Matlab на основе длин двух квазиперпендикулярных осей («Д1» и «Д2» на рис. 1, б), которые проводились через центр выделенной структуры и заканчивались на наиболее удаленной темной спиральной линии. Стоит учитывать, что данный метод идентификации границ выделяемых вихревых структур имеет весомую долю субъективности, тем не менее на его основе удалось проанализировать свойства и распространенность поверхностных проявлений вихрей для различных морей Арктики [15, 16, 20] и Онежского и Ладожского озер [9, 10].

Дополнительно привлекались изображения сканеров цвета спутника Sentinel-2A/B MSI с пространственным разрешением 10 м. Цветные изображения использовались в период малооблачной погоды за даты, близкие по времени к РЛИ при наличии нескольких вихревых проявлений. Для оценки температуры поверхности в зоне проявлений вихрей привлекались данные спектрорадиометров MODIS спутников Aqua/Terra, а также измерения радиометра VIIRS, работающего в УФ, ИК и видимом диапазоне спутника Suomi NPP с уровнем обработки L2 за даты, общие для оптических и радиолокационных изображений. Пространственное разрешение спутниковых данных температуры составило около 1 км. Регистрация проявлений вихрей и их характеристик на изображениях оптического и ИК-диапазона проводилась аналогично регистрации вихрей на РЛИ. Всего было подобрано 17 совместных спутниковых сцен, когда отмечались вихревые структуры в малооблачную погоду, при этом разница во времени между РЛИ, оптическим и ИК изображениями была не более нескольких часов.

Для анализа климатических условий в Ладожском озере за последние десятилетия привлекались результаты расчетов гидротермодинамической модели [13]. Результаты включали в себя среднесуточные значения температуры и концентрации ледяного покрова за период 1980–2020 гг. На их основе были получены среднемноголетние сезонные профили температуры для Ладожского озера в диапазоне глубин 0–100 м и оценки площади ледяного покрова за каждый месяц. Для анализа ветровых условий за рассматриваемый период и получения климатологии использовались данные реанализа ERA5¹ с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$.

3. Результаты

3.1. Общая характеристика

В результате обработки РЛИ с января по декабрь 2016–2022 гг. было зарегистрировано 867 поверхностных проявлений малых вихревых структур. Из них 698 были с циклоническим типом вращения и 169 — с антициклоническим. Детектировались преимущественно отдельные вихри, реже грибовидные структуры или вихревые дорожки.

Малые вихри встречались на всей акватории озера (рис. 2, а), но чаще всего севернее острова Валаам в области с хорошо выраженными перепадами глубин. При этом в целом в озере в прибрежных мелководных районах с глубинами до 20 м было зарегистрировано 166 проявлений вихрей, на акваториях с большими глубинами 20–50 м — 211 и 50–100 м — 316, а над глубоководной частью (глубины более 100 м) — 174. Соответственно более 60 % вихрей обнаруживаются в области развития интенсивного водообмена между литоральной зоной и глубоководной частью озера.

Диаметры зарегистрированных вихрей варьировались от 0,2 до 13,5 км, при среднем значении 2,1 км как для антициклонических, так и циклонических структур. Чаще всего (около 70 % случаев) регистрировались структуры диаметром от 200 метров до 2 км (рис. 2, б). Крупные вихри (более 5 км) преимущественно отмечались в восточной части озера в областях, близких районам впадения рек Олонка, Свирь, Сясь, Волхов. Во всех рассматриваемых интервалах изменчивости количество циклонических вихрей в 4–6 раз превышало число антициклонических. Около 93 % проявлений имели диаметр до 5 км (граница верхней оценки бароклинного радиуса Россби для Ладожского озера), что говорит об их принадлежности к субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей.

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 15.09.2023)

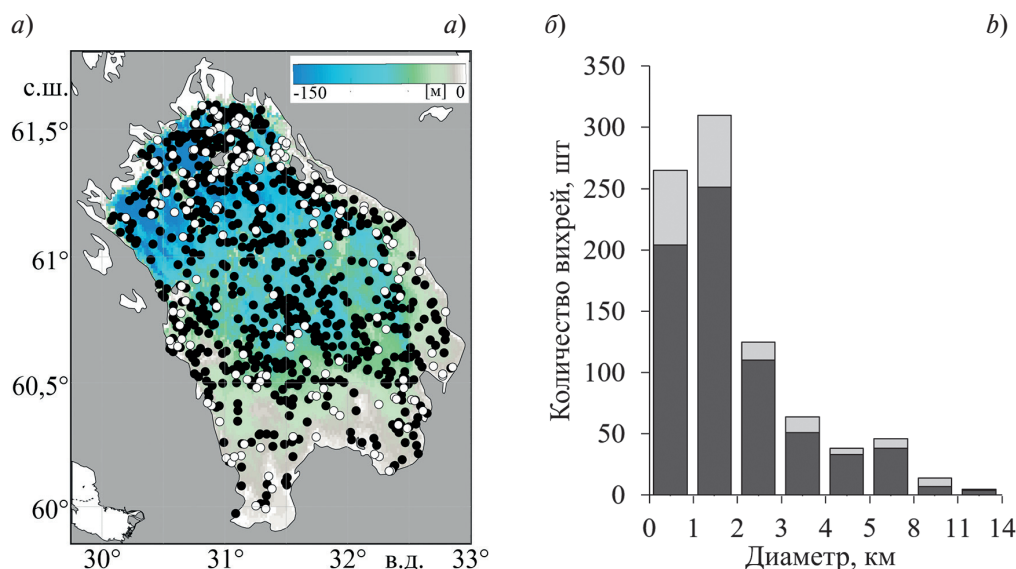


Рис. 2. Пространственное распределение центров вихрей (а) на карте глубин и гистограмма их диаметров (б) за 2016–2022 г. Темный цвет — Сп, светлый — Ас

Fig. 2. Spatial distribution of eddy centers (a) on the depth map and a histogram of their diameters (b) for 2016–2022. Dark color — Cn, light — Ac

3.2. Межгодовая изменчивость

Статистические параметры характеристик зарегистрированных проявлений субмезомасштабных структур по годам представлены в табл. 1. В 2016 г. наблюдались только одиночные вихри, большая часть из которых была в северной части озера. В 2017–2021 г. при более высокой обеспеченности снимками вихри детектировались по всей акватории. Однако в центральной части в 2018 и 2020 гг. регистрировались только отдельные вихри, а в 2021 г. структуры были сосредоточены преимущественно в центральной и северной частях озера. В 2022 вихри отмечались в основном в центральной части озера и к северу от о-ва Валаам.

Независимо от года количество проявлений вихрей циклонического вращения всегда преобладало над количеством антициклонических структур. В среднем за рассматриваемый период циклоны встречались примерно в 4 раза чаще. Изменчивость в оценках средних диаметров субмезомасштабных вихрей за год для периода хорошо обеспеченного РЛИ (2017–2021 гг.) не превышала 900 м. Устойчивого различия в средних диаметрах циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей в межгодовом интервале не прослеживалось.

Таблица 1

Table 1

Статистические параметры характеристик субмезомасштабных вихрей по годам

Statistical parameters of submesoscale eddy characteristics by years

Год	Количество вихревых структур, шт.			Диаметр, км			Количество РЛИ
	Cn	Ac	Все	Cn	Ac	Все	
2016	20	10	30	2,0	1,2	1,7	278
2017	152	40	192	2,1	2,7	2,2	596
2018	91	19	110	2,5	1,8	2,4	618
2019	118	33	151	2,0	2,3	2,1	592
2020	103	21	124	2,5	2,7	2,6	576
2021	144	34	178	1,7	1,4	1,7	589
2022	70	12	82	1,4	1,4	1,4	303
Итого	698	169	867	2,1	2,1	2,1	3552

3.3. Внутригодовая (сезонная) изменчивость

Особенности сезонной изменчивости распределения проявлений вихрей на акватории и фоновой термической стратификации вод представлены на рис. 3. Статистические оценки характеристик вихревых структур даны в табл. 2. Стоит сразу отметить, что для всех рассматриваемых сезонов статистическая обеспеченность РЛИ достаточно высока и не опускается ниже 820 изображений за сезон.

В зимний сезон (рис. 3, а, д), когда наблюдается обратная стратификация по температуре и большая часть акватории, как правило, покрывается льдом, отмечаются только отдельные вихри, регистрируемые около батиметрических неровностей дна. При этом максимальное количество вихрей фиксируется в прибрежной мелководной зоне.

В весенний сезон (рис. 3, б, д), когда после вскрытия ото льда (апрель-май) воды озера начинают интенсивно прогреваться у поверхности, число вихрей возрастает на порядок по сравнению с зимним периодом, отмечаются группы вихрей и вихревые дорожки. Максимальное количество вихрей отмечается в переходной зоне между мелководными и глубоководными районами. При этом в среднем весной отмечаются вихри меньшего размера, чем в другие сезоны, что может быть связано в основном с их формированием в достаточно узкой области термического бара [9, 21]. Еще одной особенностью весеннего сезона является почти семикратное превышение частоты регистрации циклонических структур по сравнению с антициклоническими.

Летом, когда на всей акватории озера после прохождения термического бара формируется прямая стратификация по температуре (рис. 3, в, е), вихри встречались чаще чем во все другие сезоны вместе взятые. Повышение вихревой активности происходит на пике сезонного прогрева верхнего слоя в условиях формирования приповерхностного пикноклина на всей акватории Ладожского озера. При этом субмезомасштабные структуры имеют максимально разнообразные проявления и регистрируются на всей акватории озера, но регулярнее всего к северу от о-ва Валаам. Максимальное число проявлений структур отмечается над глубинами 50–100 м. По сравнению с другими сезонами летом увеличиваются и средние диаметры регистрируемых вихревых структур.

В осенний сезон в период выхолаживания термическая стратификация ослабевает (рис. 3, г, е), число вихрей сокращается примерно в два раза по сравнению с летним сезоном. Но они по-прежнему встречаются на всей акватории от прибрежных районов до глубоководной части, и максимальная их повторяемость приходится на тот же интервал глубин, что и летом. Как и весной, увеличивается частота встречаемости циклонических структур по сравнению с антициклоническими.

В каждый отдельный сезон (табл. 2) циклонические структуры встречались чаще антициклонических. Значительное преобладание циклонических структур наиболее было выражено весной и осенью. В летний сезон с развитием стратификации чаще отмечались более крупные вихри как среди циклонов, так и среди антициклонов. При этом четкой особенностью, характерной для разных морей [19, 22], когда средний диаметр антициклонов больше — не прослеживалось.

За исключением зимнего сезона максимальное количество рассматриваемых проявлений прослеживалось над глубинами 50–100 м, поэтому можно полагать, что субмезомасштабные вихри играют важную роль в обмене между мелководными и глубоководными областями озера.

Для прояснения причин столь значительной сезонной изменчивости количества поверхностных проявлений вихрей были детализированы данные о встречаемости вихревых структур, привлечены данные по приводному ветру и площади ледового покрова, т. к. они являются важнейшими параметрами, влияющим на проявления вихревых процессов на РЛИ (см. табл. 3).

Количество зарегистрированных вихревых структур в разы меняется по месяцам. Выделяется два выраженных периода: с мая по сентябрь, когда в месяц отмечается значительное число проявлений (> 100 шт. в месяц), и с ноября по март, когда вихри на акватории Ладожского озера регистрируются эпизодически (< 10 шт. в месяц). Апрель и октябрь являются переходными месяцами между данными периодами. Период значительного количества вихрей практически совпадает с очищением акватории ото льда и с весенне-летним ослаблением ветров. Кроме того, для этого периода характерно присутствие прямой термической стратификации на большей части акватории озера. Соответственно субмезомасштабные вихри лучше развиваются в тонком приповерхностном пикноклине, наблюдаемом в Ладожском озере с мая по октябрь. Максимальное количество вихревых структур регистрируется в июле при самых слабых ветрах. Вероятно, в качестве основных механизмов ответственных за генерацию вихрей в условиях ослабления пространственно-неоднородного ветрового воздействия выступают: топографические эффекты при обтекании неровностей дна, берегов и островов; а также бароклинная и баротропная неустойчивость в области фронтальных зон различного происхождения. Таким образом субмезомасштабные вихри играют важную роль в обмене между различающимися по стратификации и глубине областями озера в условиях слабых ветров.

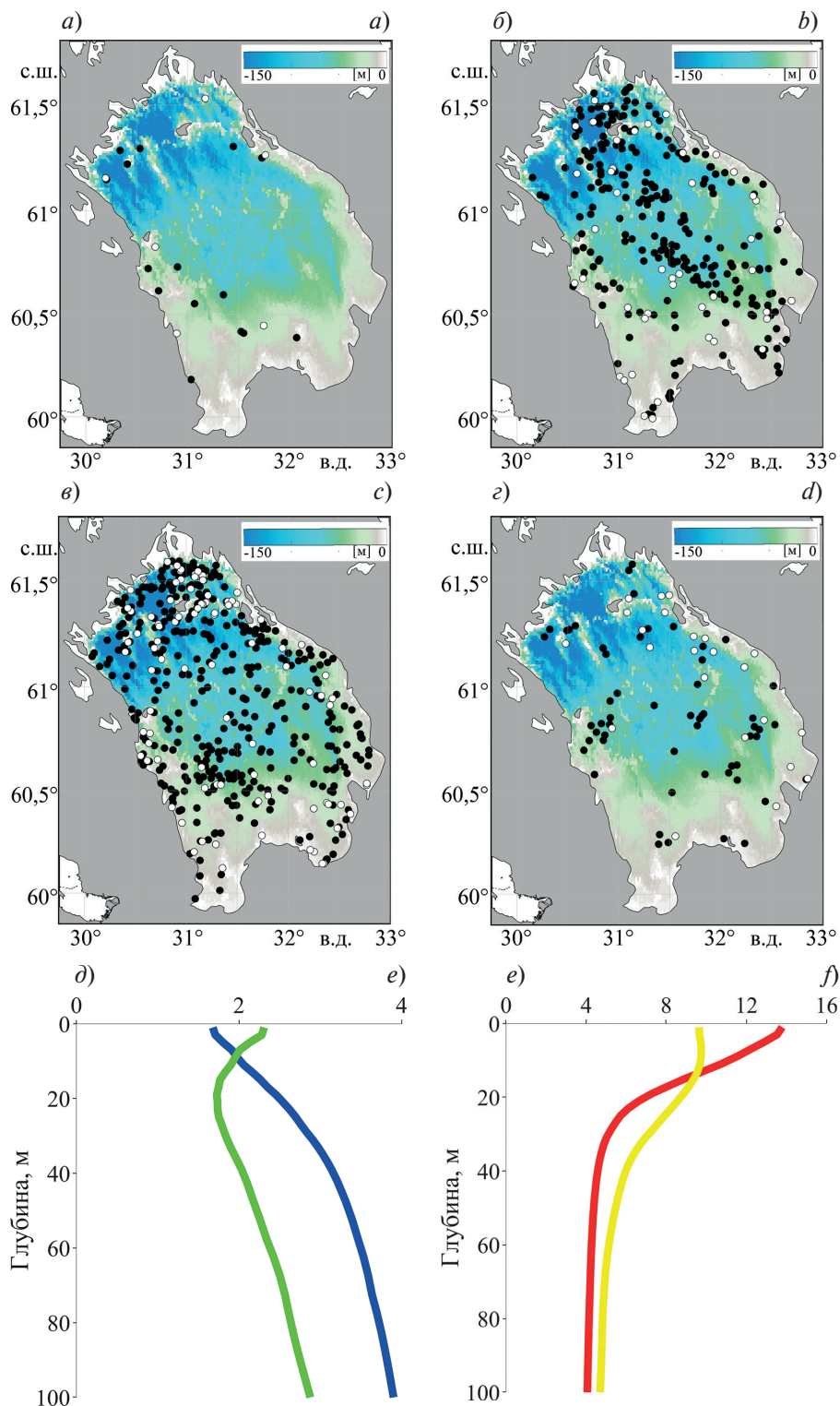


Рис. 3. Распределение положений центров (черные точки — циклоны, белые — антициклоны) вихревых структур по сезонам (*a* — декабрь-февраль, *b* — март-май, *c* — июнь-август, *d* — сентябрь-ноябрь) и профили температуры по климатическим данным, осредненным для всей акватории Ладожского озера от 0 до 100 м, за зимний период — синий цвет и за весенний — зеленый (*e*), за летний — красный и за осенний — желтый (*f*)

Fig. 3. Distribution of the positions of the centers (black dots — cyclones, white — anticyclones) of eddy structures by season (*a* — December-February, *b* — March-May, *c* — June-August, *d* — September-November) and temperature profiles according to climate data averaged for the entire water area of Lake Ladoga from 0 to 100 m, for the winter period — blue and for the spring — green (*e*), for the summer — red and for the autumn — yellow (*f*)

Таблица 2

Table 2

Статистические параметры характеристик субмезомасштабных вихрей по сезонам

Statistical parameters of submesoscale eddy characteristics by seasons

Сезон	Количество РЛИ, шт	Количество вихре- вых структур, шт	Диаметр, км	Количество вихревых структур по глубинам
		Всего (Сп/Ас)	Средний для всех (Сп/Ас)	0–20/ 20–50/ 50–100/100–250 м
Зима (декабрь–февраль)	938	23 (15/8)	1,6 (1,9/1,1)	8 / 9 / 1 / 5
Весна (март–май)	896	153 (134/19)	1,5 (1,4/1,8)	21 / 34 / 78 / 20
Лето (июнь–август)	821	467 (362/105)	2,4 (2,4/2,2)	106 / 119 / 142 / 100
Осень (сентябрь–ноябрь)	897	224 (187/37)	1,9 (1,9/2,0)	31 / 49/ 95 / 49

Таблица 3

Table 3

Количество зарегистрированных вихревых структур и климатические характеристики скорости ветра, площади ледяного покрова по месяцам

Number of registered eddy structures and climatic characteristics of wind speed, ice cover area by month

Параметр/месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Количество вихревых структур, шт.	6	9	6	24	123	140	187	140	152	65	7	8
Средняя скорость ветра, м/с	4,8	4,5	4,3	3,9	3,8	3,7	3,5	3,9	4,5	4,9	5,2	5,3
Площадь ледяного покрова, км ²	10125	15133	14830	8000	188	–				0,6	211	2757

В качестве конкретного примера обмена водами за счет вихревых структур между разделенными термическим фронтом областями водоема приведем подборку карт за 7 августа 2019 г. (рис. 4).

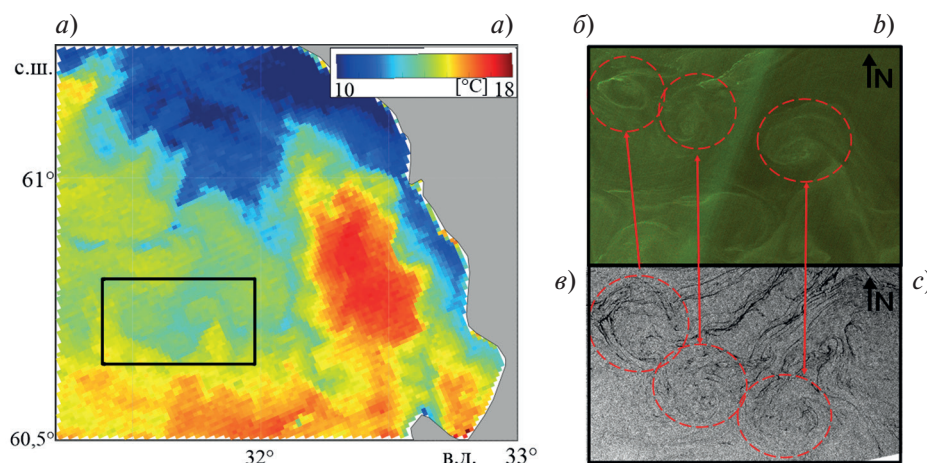


Рис. 4. Пространственное распределение поля температуры поверхности моря Suomi NPP VIIRS07.08.2019 (09:42 UTC) в северо-восточной части Ладожского озера (а), черным прямоугольником показано положение фрагментов спутниковых данных за ту же дату: изображения в видимом диапазоне Sentinel-2 (09:20 UTC) (б), радиолокационного изображения Sentinel-1 (15:24 UTC) (в). Кругами обозначены места проявлений вихрей, стрелочками — соответствие вихрей на разных изображениях

Fig. 4. Spatial distribution of the Suomi NPP VIIRS sea surface temperature field on 07.08.2019 (09:42 UTC) in the northeastern part of Lake Ladoga (a), the black rectangle shows the position of satellite data fragments for the same date: Sentinel-2 image (09:20 UTC) (b), Sentinel-1 radar image (15:24 UTC) (c). Circles indicate the locations of eddy manifestations, arrows indicate the correspondence of eddies in different images

Под влиянием воздействия в предыдущие два дня северо-западных ветров со средней скоростью 4 м/с на акватории озера сформировалась локальная фронтальная зона, разделяющая теплые воды на юге и холодные на севере, при этом акцентируем внимание на области, покрытой данными всех спутниковых сенсоров и выделенной черным прямоугольником на рис. 4, а. Отметим, что рассматриваемая область повышенных термических градиентов сформировалась над глубинами около 50 м. В этот день в условиях маловетренной погоды со стороны холодной части высокоградиентной температурной зоны на относительно небольшом участке были зарегистрированы три циклонические вихревые структуры. Они имели диаметр от 3,5 до 5,5 км и двигались (судя по смещению положений вихрей на оптическом и радиолокационном снимках) в направлении к центру озера из области фронтальной зоны. Отметим, что в связи с малыми размерами вихрей регистрировать их в поле поверхностной температуры по спутниковым данным представилось затруднительным.

Схожие картины существования проявлений групп малых вихрей на РЛИ вблизи высоко градиентных зон, отмечаемых в поле температуры поверхности, наблюдались в 9 из рассмотренных 17 случаев для которых были подобраны композитные сцены. Это позволяет полагать, что генерация субмезомасштабных структур в области фронтальных зон за счет бароклинных эффектов может быть весьма распространённым явлением, учет которого необходим при высокоразрешающем моделировании биогеохимических циклов Ладожского озера.

4. Заключение

В работе на основе анализа архива радиолокационных изображений высокого разрешения за 2016–2022 гг. была оценена многолетняя и сезонная изменчивость характеристик поверхностных проявлений малых вихрей на акватории Ладожского озера. Всего было зарегистрировано более 876 проявлений вихревых структур со средним диаметром около 2 км, что близко к климатическим оценкам бароклинного радиуса Россби для рассматриваемого региона. Они как правило встречаются в виде одиночных вихрей, реже в виде групп. Циклоны встречались примерно в 4 раза чаще антициклонов, но средние оценки их диаметров одинаковы.

Выполненное обобщение показало, что субмезомасштабные структуры являются распространенным явлением на всей акватории озера. Во все годы вихри чаще всего отмечались к северу от о-ва Валаам. Значительной межгодовой изменчивости в их характеристиках не прослеживалось, они были близки к средним многолетним. В то же время наблюдается выраженный внутригодовой (сезонный) ход характеристик субмезомасштабных структур, как в частоте и местах встречаемости, так и, в меньшей степени, в их размерах. Установлено, что на акватории озера малые вихри (более чем в 60 % случаев) регистрировались в период развития прямой термической стратификации и присутствия приповерхностного пикноклина. При этом они наиболее часто наблюдались в области глубинами 50–100 м, вблизи областей фронтальных зон различного генезиса. В зимний период из-за наличия ледового покрова количество регистрируемых вихрей снижалось на порядок.

В нашем исследовании подтверждены результаты [9, 21], что неустойчивость в области фронтальных зон в Ладожском озере может быть одной из доминирующих причин появления групп малых вихрей в условиях, когда топографические эффекты и влияние ветра не должны быть существенными. Можно полагать, что под их влиянием может формироваться значимый горизонтальный перенос тепла из прибрежной теплоактивной зоны к области термобара о недооценке которого упоминалось в [23]. Такой процесс может приводить так же к эффективному переносу вод через термобар (фронт) и, соответственно, значимо влиять на особенности вертикального и горизонтального распределения биохимических параметров на локальных акваториях.

Представленные результаты работы могут стать основой для валидации высокоразрешающих гидродинамических моделей Ладожского озера в части субмезомасштабной вихревой динамики, создаваемых для проведения прогностических оценок будущего состояния озера.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

Funding

This work was supported by Russian Science Foundation (project no. 23-17-20010) and St. Petersburg Science Foundation (project no. 23-17-20010).

Литература

1. Филатов Н.Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 3–14. doi:10.7868/S2073667319010015
2. Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. *Physics of Lakes. Volume 2: Lakes as Oscillators*. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. 646 p. doi:10.1007/978-3-642-19112-1
3. 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. Vol. 14. 4967. doi:10.3390/rs14194967
4. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime* / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. Geophysical Monograph Series 2008. Vol. 177. P. 17–38. doi:10.1029/177GM04
5. Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39, L14602. doi:10.1029/2012GL052756
6. McKinney P., Holt B., Matsumoto K. Small eddies observed in Lake Superior using SAR and sea surface temperature data // *Journal of Great Lakes Research*. 2012. Vol. 38. P. 786–797. doi:10.1016/j.jglr.2012.09.023
7. Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Kostianaia E.A., Sirota A.M. Satellite remote sensing of Lake Skadar/Shkodra // *Shkodra Lake Environment, Part of the The Handbook of Environmental Chemistry*, 2018. Vol. 80. P. 89–120. doi:10.1007/698_2018_308
8. Кондратьев К.Я., Филатов Н.Н., Зайцев Л.В., Зубенко А.В. Особенности динамики вод Ладожского озера по данным дистанционного зондирования // *Доклады АН СССР*. 1987. Т. 293, № 5. С. 1224–1227.
9. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Благодатских Е.А. и др. Субмезомасштабные вихревые структуры Ладожского озера по радиолокационным данным Sentinel-1 за теплый период 2019–2022 гг. // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2024. Т. 514, № 2. С. 350–355. doi:10.31857/S2686739724020201
10. Zimin, A.V., Blagodatskikh, E.A., Atadzhanova, O.A. Small Eddies Observed in Ladoga and Onega Lakes Using SAR Data // *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023)*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer: Cham, 2023. P. 191–197. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_22
11. 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. Vol. 14, № 19. 4967. doi:10.3390/rs14194967
12. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Lavrova O. Yu. Water Dynamics and Morphometric Parameters of Lake Sevan (Armenia) in the Summer–Autumn Period According to Satellite Data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. 2285. doi:10.3390/rs16132285
13. Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
14. Филатов Н.Н. *Гидродинамика озер*. СПб.: Наука, 1991. 200 с.
15. Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. (2020). Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125. e2019JC015832. doi:10.1029/2019JC015832
16. Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. 134. doi:10.3390/rs14010134
17. Lee J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1984. Vol. 24, N 2. P. 255–269. doi:10.1016/0734-189x(83)90047-6
18. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the sea // *Proceedings of the Royal Society of London A*. 2000. Vol. 456. P. 1217–1280. doi:10.1098/rspa.2000.0560
19. Karimova S.S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, N 10. P. 2394–2414. doi:10.1080/01431161.2016.1145367
20. Stuhlmacher A., Gade M. Statistical Analyses of Eddies in the Western Mediterranean Sea based on Synthetic Aperture Radar Imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 250. 112023. doi:10.1016/j.rse.2020.112023
21. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Melentev V.V. et al. *Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach*. London: Springer Science & Business Media, 1999. 406 p.
22. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 2. С. 80–90. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-80-90

23. Malm J., Grahn L., Mironov D., Terzhevik A. Field Investigation of the Thermal Bar in Lake Ladoga, Spring 1991 // *Hydrology Research*. 1993. Vol. 24, N 5. P. 339–358. doi:10.2166/nh.1993.12

References

1. Filatov N.N. The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019;12(1):3–14. doi:10.7868/S2073667319010015 (In Russian)
2. Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. Volume 2: *Lakes as Oscillators*. Heidelberg: Springer Berlin: 2011. 646 p. doi:10.1007/978-3-642-19112-1
3. 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;14:4967. doi:10.3390/rs14194967
4. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics. Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. *Geophysical Monograph Series*. 2008;177:17–38. doi:10.1029/177GM04
5. Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale. *Geophysical Research Letters*. 2012;39: L14602. doi:10.1029/2012GL052756
6. McKinney P., Holt B., Matsumoto K. Small eddies observed in Lake Superior using SAR and sea surface temperature data. *Journal of Great Lakes Research*. 2012, 38, 786–797. doi:10.1016/j.jglr.2012.09.023
7. Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Kostianaia E.A., Sirota A.M. Satellite remote sensing of Lake Skadar/Shkodra. *Shkodra Lake Environment, Part of the The Handbook of Environmental Chemistry*. 2018;80:89–120. doi:10.1007/698_2018_308
8. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Zaitsev L.V., Zubenkov A.V. Features of the dynamics of the waters of Lake Ladoga according to remote sensing data. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1987;293(5):1224–1227 (In Russian).
9. Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Blagodatskikh E.A. et al. Submesoscale Eddy Structures of Lake Ladoga According to Sentinel-1 Radar Data for a Warm Period of 2019–2022. *Dokly Earth Sciences*. 2024;514:296–300. doi:10.1134/S1028334X23602742
10. Zimin A.V., Blagodatskikh E.A., Atadzhanova O.A. Small eddies observed in Ladoga and Onega Lakes using SAR data. Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer: Cham; 2023, 191–197. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_22
11. 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;14(19):4967. doi:10.3390/rs14194967
12. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Lavrova O. Yu. Water Dynamics and Morphometric Parameters of Lake Sevan (Armenia) in the Summer–Autumn Period According to Satellite Data. *Remote Sensing*. 2024;16:2285. doi:10.3390/rs16132285
13. Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Konik A.A. Reproduction of the Current Climatic State of the Lake Ladoga Ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(2):50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
14. Filatov N.N. *Hydrodynamics of Lakes*. St. Petersburg: Nauka; 1991. 200 p. (In Russian).
15. Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020;125: e2019JC015832. doi:10.1029/2019JC015832
16. Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the marginal ice zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR observations in winter. *Remote Sensing*. 2022;14:134. doi:10.3390/rs14010134
17. Lee J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1984;24(2):255–269. doi:10.1016/0734-189x(83)90047-6
18. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen, F. Spirals on the sea. *Proceedings of the Royal Society of London A*. 2000;456:1217–1280. doi:10.1098/rspa.2000.0560
19. Karimova S.S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2016;37(10):2394–2414. doi:10.1080/01431161.2016.1145367
20. Stuhlmacher A., Gade M. Statistical Analyses of Eddies in the Western Mediterranean Sea based on Synthetic Aperture Radar Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2020;250:112023. doi:10.1016/j.rse.2020.112023
21. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Melentev V.V. et al. *Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach*. London: Springer Science & Business Media; 1999. 406 p.
22. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Kozlov I.E. Satellite Radar Observations of Small Eddies in the White, Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*. 2017;2:75–83. doi:10.22449/1573-160X-2017-2-75-83
23. Malm J., Grahn L., Mironov D., Terzhevik A. Field Investigation of the Thermal Bar in Lake Ladoga, Spring 1991. *Hydrology Research*. 1993;24(4):339–358. doi:10.2166/nh.1993.12

Об авторах

ЗИМИН Алексей Вадимович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор географических наук, ORCID: 0000-0003-1662-6385, Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885-2014, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: zimin2@mail.ru

АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5016-2970, ORCID: 0000-0001-6820-0533, Scopus AuthorID: 57188718743, WoS ResearcherID: R-7835-2018, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: oksanam07@list.ru

КОНИК Александр Александрович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5839-1738, ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, WoS ResearcherID: AAB-7195-2020, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: konikrshu@gmail.com

ИСАЕВ Алексей Владимирович, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0003-2005-4949, WoS ResearcherID: C-1370-2014, Scopus AuthorID: 25641182000, SPIN-код (РИНЦ): 4059-6017, e-mail: isaev1975@gmail.com