

УДК 556.55

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ SENTINEL-1 ЗА ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД 2019–2022 гг.

© 2024 г. А. В. Зимин^{1,2,3,*}, О. А. Атаджанова^{1,4}, Е. А. Благодатских^{1,4}, А. А. Коник¹,
член-корреспондент РАН Н. Н. Филатов^{1,2},
член-корреспондент РАН А. А. Родионов^{1,5}

Поступило 12.10.2023 г.

После доработки 13.10.2023 г.

Принято к публикации 17.10.2023 г.

Выполнено обобщение результатов анализа пространственно-временной изменчивости проявлений субмезомасштабных вихревых структур на поверхности с мая по октябрь 2019–2022 гг. в Ладожском озере. В качестве исходных данных использовались более 1000 высокоразрешающих изображений Sentinel – 1A/B. Выявлено широкое распространение малых вихревых структур в теплый период года на акватории озера. Всего было зафиксировано 496 поверхностных проявлений вихрей. Средний диаметр зарегистрированных проявлений составил 2 км. Более 90% зарегистрированных вихрей относятся к субмезомасштабному интервалу изменчивости. Циклонический тип вращения наблюдался у 84% структур. Сезонный максимум вихревой активности отмечается в период развития устойчивой стратификации на большей части акватории Ладожского озера. Наиболее часто вихри встречаются к северу и северо-востоку от о. Валаам в областях с глубинами около 100 метров, но вблизи неровностей дна. В период существования весеннего термобара вихревые образования нередко фиксируются с холодной стороны фронтального раздела, что указывает на их важный вклад в процессы водообмена и перемешивания.

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

DOI: 10.31857/S2686739724020201

ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр термогидродинамических процессов в глубоких, стратифицированных озерах, в том числе и в Ладожском озере, изучен достаточно подробно [1–3]. Это позволило выявить закономерности изменчивости гидрофизических полей в крупном, мезо- и мелкомасштабном интервалах. В крупных озерах основные термогидродинамические процессы подобны

океаническим, в частности, спектры колебаний течений и температуры в океане [4] и крупном озере [1] во многом схожи. Общей проблемой, возникающей при исследовании крупных стратифицированных водоемов с использованием традиционных подходов к проведению измерений, является недостаток сведений об изменчивости гидрологических явлений с характерными размерами от сотен метров до единиц километров на всей акватории [5]. Этот интервал изменчивости порядка бароклинного радиуса Россби, размер которого в Ладожском озере колеблется от 2 до 5 км [1], выделяется в особый диапазон – “субмезомасштаб”. Процессы в нем не описываются полностью положениями квази-геострофической теории и в то же время не являются в полной мере изотропно трехмерными, негидростатическими процессами [6], и оказывают значительное влияние на горизонтальный и вертикальный обмен на локальных акваториях [5]. В последние десятилетия представления о роли субмезомасштабных вихревых структур

¹Институт океанологии им. П. П. Шишова
Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт водных проблем Севера Карельского научного
центра, Петрозаводск, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

⁴Морской гидрофизический институт
Российской Академии наук, Севастополь, Россия

⁵Санкт-Петербургский научный центр
Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: zimin2@mail.ru

в динамике вод стремительно растет за счет анализа постоянно поступающих высокоразрешающих (десятки метров) данных спутниковых радиолокационных наблюдений [5, 7, 8].

Вихревые структуры масштаба сотни метров — единицы километров неоднократно регистрировались в Ладожском озере при проведении специализированных исследований [1, 9–14], однако сведения об их роли в процессах, происходящих в Ладожском озере, без широко-масштабного обобщения имеют характер качественных оценок или гипотез. Одним из наиболее полных исследований вихревых структур для озер из космоса является работа [15], в которой в озере Верхнее на основе 361 радиолокационного изображения ERS-1,2 с разрешением 30 м в теплое время года для периода 1992–1998 гг. были зарегистрированы 45 малых вихрей, а также получены их характеристики (положение, диаметр, тип вихря: циклонический/антициклонический). Авторы установили, что в среднем вихри имеют диаметр 9.8 км, часто встречаются в районах резкого температурного градиента $3\text{--}5^\circ\text{C}/3\text{ км}$. Кроме этого, известны исследования вихрей масштабом порядка единиц километров по спутниковым данным в озере Байкал, однако там внимание исследователей было приковано к вихрям в ледовых полях вследствие простоты их идентификации [16, 17].

Цель данной работы — получить количественную оценку пространственно-временной изменчивости характеристик малых вихревых структур на акватории Ладожского озера в течение теплого сезона на основе данных спутниковых радиолокационных измерений Sentinel-1, выполненных с мая по октябрь 2019–2022 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных использовались 1023 радиолокационных изображения (РЛИ) Sentinel-1 A/B в C-диапазоне и IW режиме съемки с разрешением 20 м за период с мая по октябрь 2019–2022 гг. РЛИ были получены с сайта Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 1 декабря 2022 г.)). За 2019 г. было проанализировано 293 РЛИ, за 2020 г. — 276, за 2021 — 303, за 2022 — 151. Отметим, что меньшее количество РЛИ за 2022 год связано с завершением миссии спутника Sentinel-1B. Среднее покрытие по всей акватории составило около 285 радиолокационных снимков на единицу площади за весь период (рис. 1 а).

Вихри регистрировались как структуры, проявляющиеся на РЛИ в виде закрученных в спирали или дуги контрастных полос (рис. 1 б). С использованием ПО ESA SNAP по методике, описанной в [8], для каждого вихря определялись: координаты центра, диаметр и тип вращения (циклонические — против часовой стрелки (C), антициклонические — по часовой стрелке (Ac)). На основе полученных данных оценивались характеристики пространственной и временной изменчивости проявлений малых вихрей. Для каждых суток, когда на акватории отмечались вихри, их распределение сопоставлялось с пространственным распределением среднесуточной температуры на поверхности Ладожского озера по данным спутника MODIS/Aqua.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ РЛИ, покрывающих акваторию Ладожского озера за май–октябрь 2019–2022 гг., позволил зарегистрировать 496 поверхностных проявлений вихревых структур. Из них 374 проявления были с циклоническим типом вращения и 85 — с антициклоническим. Показано, что малые вихревые структуры встречаются на всей изучаемой акватории (рис. 2 а). Они отмечались как в мелководных прибрежных районах (бухта Петрокрепость, Волховская и Свирская губы), так и в открытой глубоководной части озера. Чаше всего вихри регистрировались к северу и северо-востоку от острова Валаам, в относительно глубоководном районе (средняя глубина более 100 м), характеризующемся резкими перепадами глубины. Среди них отмечались как отдельные вихри, так и дипольные структуры, а также вихревые дорожки. Подобные проявления характерны для районов озера, где наблюдается локальный сдвиг течений, например, под воздействием вдольбереговых потоков и топографии дна или взаимодействия различных типов вод.

Диаметры зарегистрированных вихрей изменялись от 0.2 до 13.5 км, при этом около 90% проявлений (как циклонических, так и антициклонических) имели диаметр до 5 км (рис. 2 б), что не превышает верхней оценки бароклинного радиуса Россби для Ладожского озера. Усредненный же по данным всех наблюдений диаметр вихревых структур составил 2 км. При этом средний диаметр циклонов (1.9 км) был несколько меньшим, чем у антициклонов (2 км).

Статистические характеристики внутрисезонной изменчивости количества зарегистрируемых проявлений представлены в табл. 1. Количество анализируемых РЛИ от месяца к месяцу варьировалось незначительно, от 164 до 181

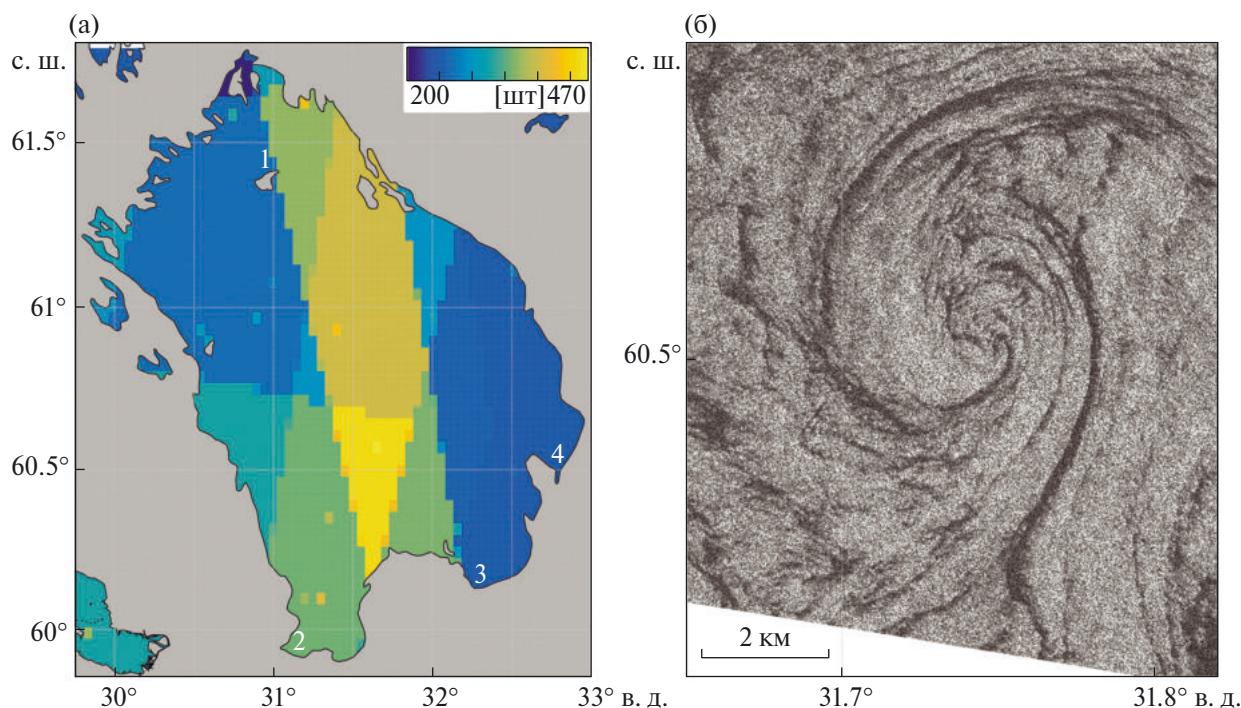


Рис. 1. а – Карта покрытия радиолокационными изображениями Ладожского озера с мая по октябрь 2019–2022 гг. (шкала представлена в количестве РЛИ), где цифрами обозначены: 1 – остров Валаам, 2 – бухта Петрокрепость, 3 – Волховская губа, 4 – Свирская губа. б – Фрагмент РЛИ Sentinel-1 от 19.08.2020 04:08 (UTC), на котором отображено проявление циклонической вихревой структуры.

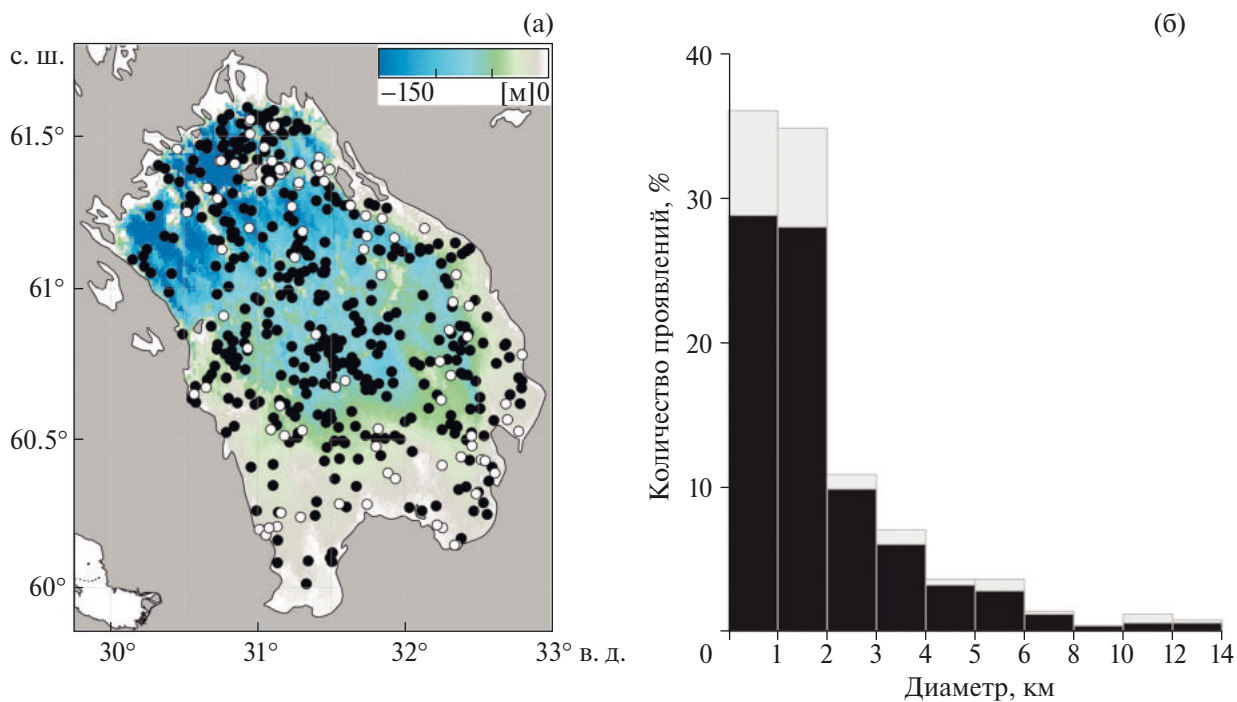


Рис. 2. Пространственное распределение центров вихрей (а) и гистограмма их диаметров (б) за май-октябрь 2019–2022 г. Черный цвет – циклонические проявления, белый – антициклонические. Шкала глубин на рисунке в метрах.

Таблица 1. Внутрисезонная изменчивость характеристик субмезомасштабных вихревых структур за 2019–2022 гг.

Месяц	Количество РЛИ, шт.	Количество вихрей, шт.			Средний диаметр, км		
		С	Ас	Итого	С	Ас	Итого
Май	166	72	7	79	1.1	1.8	1.2
Июнь	164	56	18	74	1.7	2.7	1.9
Июль	164	72	22	94	2.1	1.0	1.8
Август	181	78	15	93	3.2	2.7	3.1
Сентябрь	173	90	10	100	1.9	3.1	2.1
Октябрь	175	37	19	56	1.4	1.5	1.4

изображения. Число отмеченных циклонических структур во все месяцы было в разы, а иногда и на порядок, больше антициклонических. Субмезомасштабные вихри чаще всего регистрировались в июле-сентябре, когда устойчивая термическая стратификация охватывала всю или большую часть глубоководной акватории озера. Абсолютный минимум вихрей регистрировался в октябре, когда уменьшаются температурные неоднородности, способствующие развитию сдвиговой неустойчивости, и наблюдается усиление ветровой деятельности, маскирующей проявления вихрей на поверхности водоема.

Полученные среднемесячные оценки диаметров вихревых структур также показывают их зависимость от развития стратификации на акватории озера. Минимальные диаметры вихревых структур отмечались в условиях формирования и разрушения устойчивой термической стратификации в мае и октябре, максимальные — в августе. Это дает основание полагать, что в условиях развитой стратификации малые вихри имеют большее время существования. Соответственно субмезомасштабные структуры, возникающие по разным причинам в июле-сентябре, могут вносить более значительный вклад в вертикальный обмен, чем в другие месяцы.

Значительное число вихрей, отмечаемое в период активного движения термобара в мае-июле, говорит о том, что они оказывают также влияние на обмен между стратифицированными и изотермическими областями озера даже в условиях слабых ветров. В качестве примера, подтверждающего возможность интенсивного заброса теплых вод в “холодную” зону термобара, отмеченную еще в [10], приведем данные за 9 мая 2019 г (рис. 3), полученные в условиях маловетренной погоды. В этот день было зарегистрировано девять вихревых циклонических структур. Все они отмечались в теплоинертной области, ограниченной изотермой 4°C, которая обычно принимается за положение термобара. Три одиночных вихря с диаметром от 1.4 до 1.9 км регистрировались в южной части озера вблизи термобара. Шесть вихрей отмечались к северо-северо-востоку от острова Валаам. Они вытянулись в виде цепочки от берега, вблизи которого прослеживался термобар в сторону острова. Вихревые структуры здесь имели диаметры от 0.5 до 0.8 км. Отметим, что в связи с малыми размерами вихрей регистрировать их в поле температуры не представляется возможным ввиду недостаточного разрешения измерений по спутниковым данным.

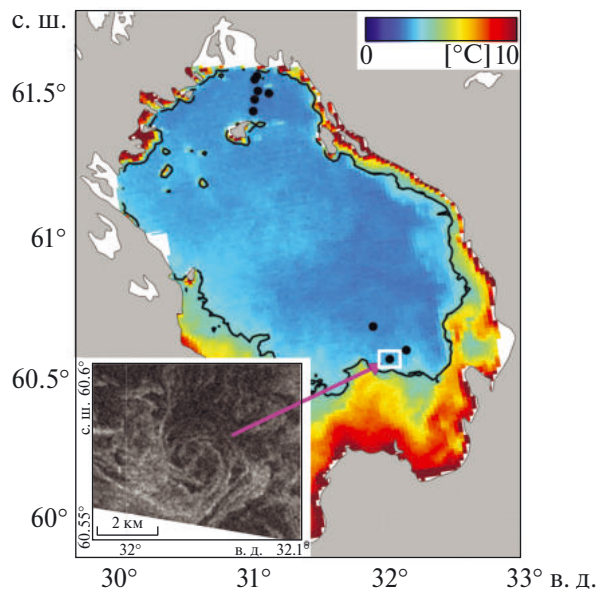


Рис. 3. Пространственное распределение среднесуточной температуры поверхности Ладожского озера по данным спутника MODIS/Aqua за 09.05.2019 г. На врезке — фрагмент РЛИ с поверхностным проявлением вихревой структуры по данным спутника Sentinel 1B за 09.05.2019 04:08 (UTC). На карте черной линией обозначено положение термобара, соответствующее изотерме 4°C, белый прямоугольник — положение фрагмента РЛИ.

ВЫВОДЫ

В результате анализа свыше 1000 высокоразрешающих спутниковых радиолокационных изображений за май–октябрь 2019–2022 гг. было зарегистрировано 496 поверхностных вихревых проявлений со средним диаметром 2 км. При этом циклонические вихри преобладали над антициклоническими почти в 4,5 раза. Были детектированы одиночные вихри и группы вихревых структур разнообразных форм. Чаще всего на акватории озера малые вихри регистрировались в период активного движения термобара и развития устойчивой стратификации над глубоководными районами озера. Подтверждено, что они могут вносить существенный вклад в обмен по вертикали и через термобар, как это показано в [18].

Выполненное обобщение показывает, что субмезомасштабные вихри являются распространенным явлением на акватории Ладожского озера. Интересно, что некоторые характеристики субмезомасштабных вихрей на акватории озера наблюдались и в различных морях Мирового океана. В частности, это касается того, что количество вихрей циклонического вращения может преобладать над количеством вихрей с антициклоническим вращением [5, 7, 8]. Вероятно, благоприятными причинами для доминирования циклонических субмезомасштабных вихрей (в северном полушарии) являются фоновая циклоническая завихренность и вращающий момент придонного трения. Второй фактор очевидно наиболее важен для Ладожского озера.

Сведения о частой встречаемости малых вихревых структур на акватории озера являются фактом, требующим совершенствования существующих гидродинамических моделей Ладожского озера.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 200 с.
2. Филатов Н.Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // Фундаменталь-

ная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.7868/S2073667319010015>.

3. Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. Volume 2: Lakes as Oscillators. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. 646 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19112-1>
4. Монин А.С., Каменкович В.М., Корп В.Г. Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 362 с.
5. Зимин А.В. Субприливные процессы и явления в Белом море. М.: ГЕОС, 2018. 220 с.
6. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Geophysical Monograph Series. 2008. V. 177. P. 17–38. <https://doi.org/10.1029/177GM04>
7. Karimova S., Gade M. Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37. № 10. P. 2394–2414. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1145367>
8. Atadzhanova O.A., Zimin A.V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2019. V. 12. № 3. P. 36–45.
9. 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.
10. Кондратьев К.Я., Липатов В.В., Тихомиров А.И. Тонкая структура термобара // Доклады АН СССР. 1988. Т. 300. № 1. С. 216–219.
11. 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.
12. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Петрова Т.Н., Протопопова Е.В., Крючков А.М. Натурный эксперимент “Термический фронт-Ладога-2010” // Доклады РАН. 2012. Т. 444. № 1. С. 83–87.
13. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 24–38. <https://doi.org/10.7868/S0321059614010088>.
14. Гузиватый В.В., Науменко М.А. Течения на поверхности Ладожского озера на основе последовательных ИК-спутниковых съемок // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях

- изменяющегося климата. М.: Российская академия наук, 2021. С. 232–243.
15. *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. V. 38. P. 786–797. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2012.09.023>
 16. *Kouraev A., Zakharova E., Rémy F., Kostianoy A., Shimarayev M., Hall N., Zdorovenkov R., Suknev A.* Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) // *Limnol-*
 - ogy and Oceanography*. 2019. V. 64. P. 2738–2754. <https://doi.org/10.1002/lno.11338>
 17. *Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Зырянов Д.В.* Каньонные вихри. Приложение теории топографических вихрей к феномену ледовых колец Байкала // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49. № 2. С. 132–141. <https://doi.org/10.31857/S0321059622020195>.
 18. *Чубаренко И.П.* Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с.

SUBMESOSCALE EDDY STRUCTURES OF LAKE LADOGA ACCORDING TO RADAR DATA OF SENTINEL-1 FOR THE WARM PERIOD 2019–2022

A. V. Zimin^{a, b, c, #}, O. A. Atadzhanova^{a, d}, E. A. Blagodatskikh^{a, d}, A. A. Konik^a,

Corresponding Member of the RAS N. N. Filatov^{a, b},

Corresponding Member of the RAS A. A. Rodionov^{a, e}

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation*

^b*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Petrozavodsk,
Russian Federation*

^c*St. Petersburg University, St. Petersburg, Russian Federation*

^d*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Russian Federation*

^e*Saint-Petersburg Research Center, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: zimin2@mail.ru*

Summary of the results of the analysis of the spatiotemporal variability of sub-mesoscale eddy structures on the surface for Lake Ladoga from May to October 2019–2022 is conducted. The original data consists of over 1000 high-resolution Sentinel-1A/B images. It has been found that eddy structures are widely distributed during the warm period of the year in the lake's basin. A total of 496 surface manifestations of eddies were recorded. The average diameter of the observed structures was 2 km. More than 90% of the recorded eddies belong to the sub-mesoscale variability range. Cyclonic rotation was observed in 84% of the structures. The seasonal maximum of eddy activity is observed during the development of stable stratification over most of Lake Ladoga. Eddies are most frequently encountered to the north and northeast of Valaam Island in areas with depths of around 100 meters, but in close proximity to the unevenness of the seabed. Eddy formations are often observed on the cold side of the frontal boundary during the existence of the spring thermocline, indicating their important contribution to water exchange and mixing processes.

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