

# Многолетняя изменчивость поверхностных проявлений вихрей в Карском море\*

А. А. Коник<sup>1</sup>, А. В. Зимин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Российская Федерация, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36,

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Коник, А. А., Зимин, А. В. (2024). Многолетняя изменчивость поверхностных проявлений вихрей в Карском море. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 356–371. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.208>

В работе дана количественная оценка многолетней изменчивости характеристик малых вихревых структур в Карском море на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1A/B за август 2015–2021 гг. Для сопоставления с изменчивостью характеристик в различные годы привлекались данные о скорости ветра, площади льда и толщине перемешанного слоя. За указанный период идентифицировано 6340 поверхностных проявлений вихрей со средним диаметром 2.9 км преимущественно циклонического типа вращения. Наименьшее число поверхностных проявлений регистрировалось в 2016 г. — 468 вихрей, а наибольшее в 2021 г. — 1247 вихрей. Установлено, что основные районы встречаемости проявлений расположены в юго-западной и центральной частях Карского моря над свалами глубин западнее и северо-западнее полуострова Ямал и в областях стоковой фронтальной зоны и поверхностного опресненного слоя вблизи устьев Оби и Енисея. Существенное преобладание циклонических вихрей над антициклоническими прослеживается во все годы, при этом их средний диаметр изменяется от 2.3 км в 2017 г. до 3.7 км в 2021 г. Изменчивость количества зарегистрированных вихрей, предположительно, связана с влиянием интенсивности ветрового напряжения в приводном слое атмосферы на морскую поверхность. Значительная часть малых вихрей регистрируется при скорости ветра 5 м/с в развитом перемешанном слое толщиной более 10 м. Показано, что наиболее вероятной причиной генерации вихрей является взаимодействие прилива с топографическими неровностями дна и бароклинная неустойчивость, отмечающаяся в стоковой фронтальной зоне.

*Ключевые слова:* вихри, радиолокатор с синтезированной апертурой, субмезомасштаб, ветер, приливы, стоковая фронтальная зона, Карское море.

## 1. Введение

Малые вихревые структуры, несмотря на их масштаб, играют важную роль в интенсификации перемешивания, переносе солей, тепла, взвешенных веществ (Alpers et al., 2013; Dong et al., 2016; Cassianides et al., 2021). При этом вихри с размером меньше первого бароклинного радиуса деформации (радиус деформации

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания № FMWE-2024-0028.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

Россби), величина которого для Карского моря не превышает 5 км (Nurser and Bacon, 2014), часто называют субмезомасштабными (Karimova and Gade, 2016).

Субмезомасштабные вихри не принадлежат к трехмерным мелкомасштабным явлениям и в то же время не относятся к гидростатически сбалансированным процессам (Thomas et al., 2008). Такие структуры характеризуются малыми пространственным (порядка единиц километров) и временным (от нескольких часов до суток) масштабами. Известно, что за счет значительных вертикальных скоростей они могут вносить весомый вклад в вертикальный обмен (Aleskerova et al., 2021), который будет особенно значим в районах частой встречаемости субмезомасштабных вихрей. В натуральных условиях малые вихри исследуются по данным контактных и дистанционных наблюдений, причем наибольший объем сведений об их характеристиках можно получить при использовании многолетних архивов данных спутниковых радиолокационных наблюдений (Зимин, 2018).

В связи с появлением дополнительной свободной ото льдов площади в Арктике (Overland et al., 2013; Yamanouchi and Takata, 2020) и запуском новых спутниковых систем с возможностью получения радиолокационных изображений (РЛИ) наблюдается увеличение объема исследований поверхностных проявлений вихрей (ППВ) в морях Северного Ледовитого океана (СЛО) (Атаджанова и др., 2017; Зубкова и Козлов, 2020; Bashmachnikov et al., 2020; Kozlov and Atadzhanova, 2022), в частности в Карском море. Данное море отличается от других морей СЛО наличием большого объема поступающего речного стока из Оби и Енисея. В области перемешивания морских и речных вод формируется стоковая фронтальная зона (СФЗ), характеризующаяся ярко выраженными термохалинными градиентами и неоднородностями в поле плотности (Атаджанова и др., 2017; Osadchiev et al., 2020; Коник и др., 2022), которые могут влиять на частоту проявлений вихрей. Характерные для юго-западной и северной частей Карского моря топографические неоднородности рельефа дна, в которых происходит диссипация приливной волны, также могут являться потенциальными районами генерации ППВ. Кроме того, последние исследования (Ruggieri et al., 2017; Osadchiev et al., 2022; Прохорова, 2022) указывают на межгодовые изменения характеристик гидрологического режима моря за счет изменений сезонного ледового покрова, транспорта атлантических вод и трансформации атмосферных переносов. Влияние этих процессов должно находить отражение в параметрах толщины перемешанного слоя (*MLD* — *Mixed Layer Depth*) вод Карского моря, что впоследствии влияет на ППВ и актуализирует изучение межгодовой изменчивости их характеристик в данном регионе.

Описания характеристик вихрей в Карском море, представленные в работах (Атаджанова и др., 2017; Артамонова и др., 2021), основаны на анализе РЛИ и были направлены на изучение их внутрисезонной динамики за отдельные годы как для всей акватории моря, так и для областей фронтальных зон. Было показано, что большая часть вихрей в Карском море детектировалась в августе и относилась к субмезомасштабному интервалу изменчивости. В то же время анализ вихревой активности в Карском море на многолетнем временном интервале ранее не выполнялся, что стало основной задачей данной работы.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка и анализ причин многолетней изменчивости характеристик малых вихревых структур в Карском море на основе РЛИ за август 2015–2021 гг.

## 2. Данные и методы

Для регистрации ППВ в Карском море за август 2015–2021 гг. выполнен анализ 2405 (в 2015 г. — 310; в 2016 г. — 389; в 2017 г. — 373; в 2018 г. — 323; в 2019 г. — 304; в 2020 г. — 368; в 2021 г. — 338) РЛИ со спутника Sentinel-1A/B, полученных в С-диапазоне на ВВ-поляризации и в режимах съемки EW (Extra Wide, ширина полосы обзора — 400 км, пространственное разрешение — 40 м) и IW (Interferometric Wide, ширина полосы обзора — 250 км, пространственное разрешение — 25 м) с пространственным разрешением около 40 и 90 м.

На рис. 1 представлена карта суммарного (с 2015 по 2021 г.) покрытия района исследований спутниковой радиолокационной съемкой, согласно которой максимальное покрытие (более 250 РЛИ) наблюдается для районов к востоку от арх. Земли Франца Иосифа (ЗФИ) на севере Карского моря и вблизи арх. Новая Земля. В центральной части Карского моря многолетнее покрытие в среднем составляет 150–200 РЛИ, в юго-западной — не более 150 РЛИ, а в юго-восточной менее 100 РЛИ.

Для оценки возможности проявления и выявления основных механизмов генерации ППВ в Карском море за август 2015–2021 гг. привлекались среднемесячные скорость и направление ветра в приводном слое атмосферы из реанализа ERA-5

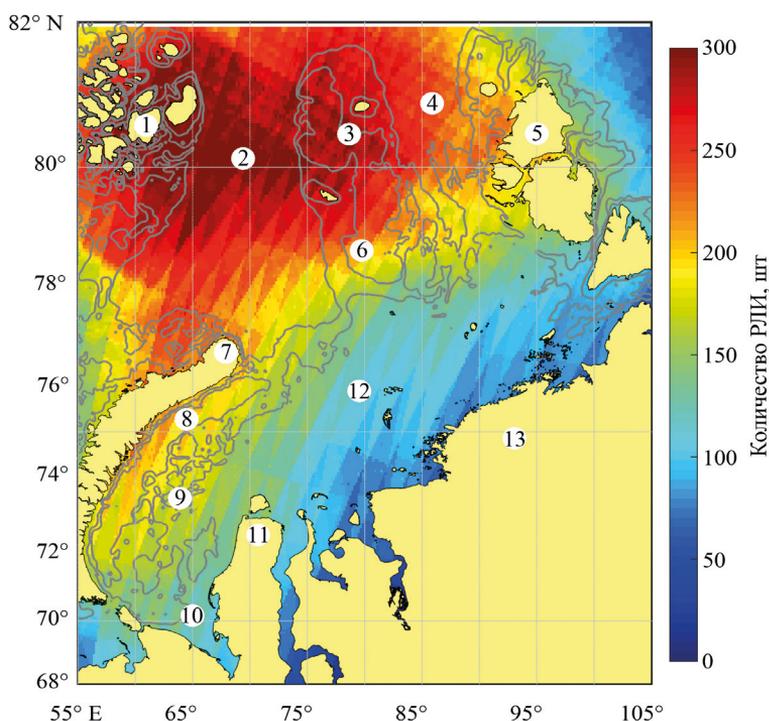


Рис. 1. Суммарная карта покрытия спутниковыми РЛИ акватории Карского моря за август 2015–2021 гг.:

1 — арх. Земля Франца Иосифа; 2 — желоб Святой Анны; 3 — желоб Воронина; 4 — арх. Северная Земля; 5 — Центрально-Карский желоб; 6 — арх. Новая Земля; 7 — Новоземельский желоб; 8 — Западно-Карская ступень; 9 — п-ов Ямал; 10 — п-ов Таймыр. Серыми линиями отмечены изобаты 100 и 200 м

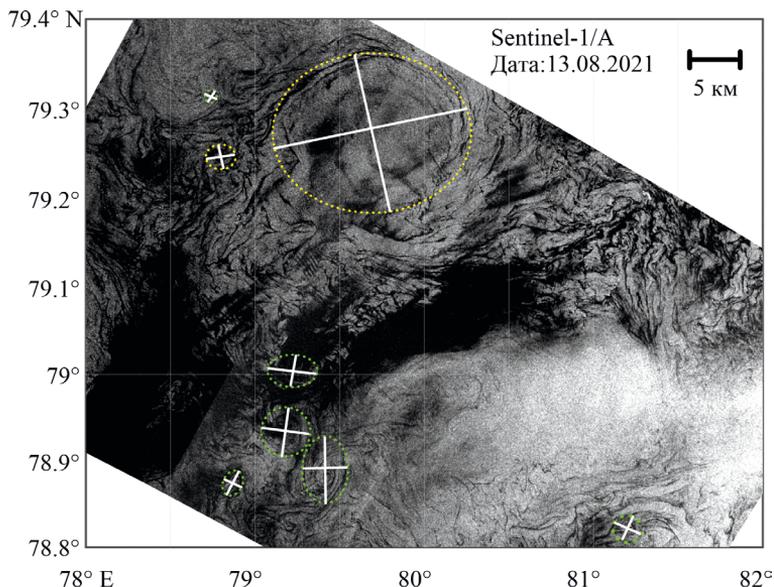


Рис. 2. Пример применения методики выделения ППВ на РЛИ Sentinel-1/A за 13 августа 2021 г.: желтыми точками показаны границы наиболее удаленной темной спиральной линии выделяемого антициклонического проявления, а зелеными — циклонического; белыми линиями показаны оси поперек центра выделенной структуры, по которым считался средний диаметр, их пересечение принималось за центр вихря

(Hersbach et al., 2020); толщина перемешанного слоя наборов данных *GLORYS12V1*<sup>1</sup> и *MERCATOR PSY4QV3R1*<sup>2</sup>. Кроме этого, использовались характеристики площади ледяного покрова Карского моря, представленные на сайте Бременского университета (Spreen et al., 2008). Определение динамики и параметров СФЗ выполнялось с помощью среднемесячных спутниковых измерений температуры (MODIS/Aqua и VIIRS/Suomi NPP<sup>3</sup>), солёности (NASA SMAP<sup>4</sup>) и уровня моря (AVISO<sup>5</sup>) по методике из (Коник и др., 2022). Влияние приливной динамики на формирование вихрей оценивалось на основе колебаний уровня на южной оконечности о. Белый<sup>6</sup>, полученных для пункта Екатерининская Гавань.

Регистрация вихрей на РЛИ выполнялась на основе метода, представленного в работах (Bashmachnikov et al., 2020; Kozlov and Atadzhanova, 2022). В программном обеспечении SNAP начальные изображения были откалиброваны и сглажены для уменьшения шумов с помощью фильтра Ли (Lee, 1983). Затем на каждом отдельном РЛИ (рис. 2) вручную находились закрученные в дуги темные контрастные полосы (относительно фона), которые образовались за счет накопления естественных пленок в областях конвергенции поверхностных течений (Munk et al., 2000; Karimova and Gade, 2016). Центр выделенной на радиолокационном изображении спирали

<sup>1</sup> Доступно на: <https://doi.org/10.48670/moi-00021> [Дата доступа 20.08.2022].

<sup>2</sup> Доступно на: <https://doi.org/10.48670/moi-00016> [Дата доступа 20.08.2022].

<sup>3</sup> Доступно на: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. [Дата доступа 20.08.2022].

<sup>4</sup> Доступно на: <https://podaac.jpl.nasa.gov>. [Дата доступа 20.08.2022].

<sup>5</sup> Доступно на: <https://resources.marine.copernicus.eu>. [Дата доступа 20.08.2022].

<sup>6</sup> Доступно на: <https://www.wxtide32.com>. [Дата доступа 20.08.2022].

принимался за центр вихревой структуры. Тип закрутки вихревой структуры (циклонические — С и антициклонические — Ас) определялся на изображении визуально, а средний диаметр рассчитывался в среде MathWorks ©Matlab на основе двух квазиортогональных осей, которые проводились поперек центра 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 ППВ для различных морей Арктики (Атаджанова и др., 2017; Зимин, 2018; Mensa et al., 2018; Коник и др., 2020; Bashmachnikov et al., 2020; Kozlov and Atadzhanova, 2022).

Данные о скорости ветра, площади льда и толщине перемешанного слоя сопоставлялись с характеристиками и пространственным положением ППВ в различные годы. На основании полученных положений и характеристик СФЗ и ППВ определялась частота повторяемости вихрей в области фронтальной зоны. Для района максимальной многолетней встречаемости вихрей выполнялась оценка влияния приливной динамики на количество ППВ в разные фазы. Приливные колебания уровня за месяц разделялись на сизигийные и квадратурные периоды и для каждого из этих интервалов времени оценивалось количество малых вихрей в выделенном районе.

### 3. Результаты работы

#### 3.1. Многолетняя изменчивость ППВ в Карском море

Как следует из анализа рис. 3, а, вихревые структуры в Карском море за период с 2015 по 2021 г. встречались повсеместно. Отмечались как отдельные вихревые структуры, так и группы, диполи и цепочки вихрей. Основные районы встречаемости ППВ расположены в юго-западной и центральной частях Карского моря около арх. Новая Земля, п-ва Ямал и вблизи устьевых зон рек Оби и Енисея. Большинство из них наблюдалось в районах с меняющейся донной топографией: желоба Святой Анны, Западно-Карской ступени, Ямало-Гыданской отмели, что совпадает с результатами работы (Атаджанова и др., 2017). В качестве областей частой регистрации ППВ, не отмеченных ранее, стоит выделить Новоземельский и Центрально-Карский желоб и желоб Воронина.

Для сопоставления интенсивности вихреобразования в районе исследований в различные годы была посчитана относительная частота встречаемости (безразмерный показатель, отражающий долю вихрей на РЛИ, который равен отношению количества вихрей к количеству РЛИ на единицу сетки  $\sim 1200 \text{ км}^2$ ), представленная на рис. 3, б. Как видно, частота встречаемости вихревых структур варьируется от 0.01–0.04 в северных районах Карского моря, вблизи свалов глубин арх. ЗФИ, желобов Святой Анны и Воронина. В центральной и юго-западной частях Карского моря вихри встречаются чаще, там среднее значение многолетней частоты проявления составляет 0.07–0.1. Район максимальной многолетней встречаемости располагается над свалом глубин западнее п-ва Ямал и обозначен черным прямоугольником на рис. 3, б. Другие области повышенной встречаемости ППВ частично совпадают со средним многолетним положением СФЗ и наблюдаются вблизи устьевых зон рек

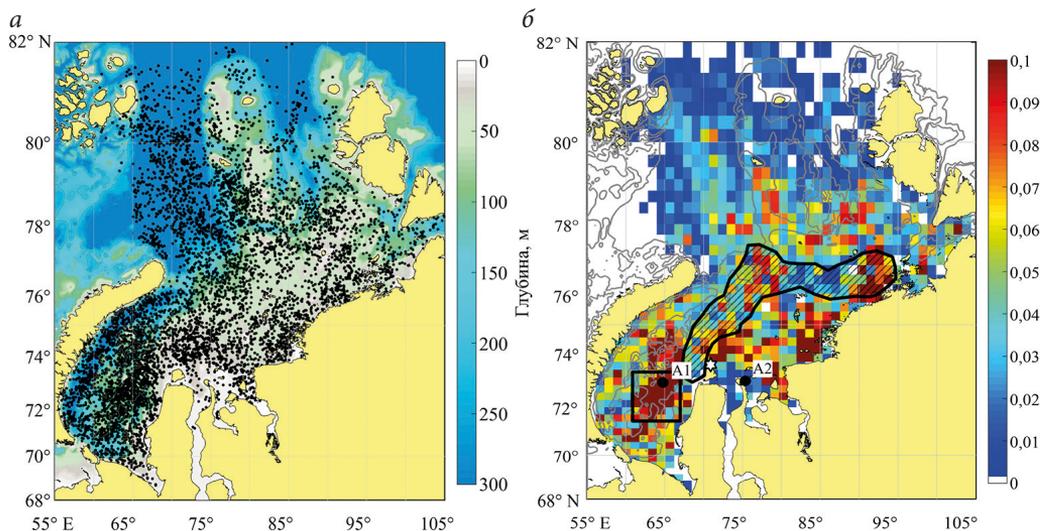


Рис. 3. Общее количество вихрей (а) и частота их проявлений (отношение количества вихрей и числа РЛИ) (б) на акватории Карского моря за августы с 2015 по 2021 г.

На рисунке (б) черным квадратом выделена область, выбранная для оценки влияния приливной динамики; белой звездой обозначено положение станции измерения уровня моря — п. Екатерининская гавань; А1 — точка, выбранная для анализа MLD в морских водах; А2 — точка, выбранная для анализа MLD в речных водах; черной заштрихованной областью выделено среднее многолетнее положение СФЗ (Коник и др., 2022). Серыми линиями отмечены изобаты 100 и 200 м

Оби и Енисея. Стоит отметить, что все эти районы находятся вне зоны максимального покрытия снимками, отмечаемого в северной части моря (см. рис. 1).

Представление о многолетней количественной изменчивости характеристик вихревых структур можно получить из табл. 1. Видно, что число зарегистрированных проявлений сильно разнится от года к году и варьируется от 468 вихрей в 2016 г. до 1247 в 2021 г. Во все годы в Карском море число циклонических вихрей превалирует над антициклоническими, а их средний диаметр изменяется от 2.3 км в 2017 г. до 3.7 км в 2021 г. Полученные оценки средних диаметров структур не превышают величину бароклинного радиуса деформации Россби, который для Карского моря составляет не более 5 км (Nurser and Vason, 2014), и позволяют отнести их большую часть к субмезомасштабным вихрям. В последние годы отмечается устойчивая тенденция увеличения числа вихрей, что, вероятно, связано с трансформацией поверхностного слоя вод вне речного плюма в результате увеличения объемов таяния ледяного покрова в области Карского моря (Kumar et al., 2021). Такая тенденция наилучшим образом прослеживается по данным 2019–2021 гг.

Несмотря на значительную межгодовую изменчивость размеров вихрей, их максимальная повторяемость наблюдается с диаметром, немногим меньшим или близким к приведенным выше оценкам средних значений радиуса Россби (рис. 4). Вихри с диаметром более 6 км встречаются гораздо реже (не более 10 % случаев). Чаще всего циклонические образования имели диаметр от 2 до 4 км, в то время как размер антициклонических был несколько крупней и составлял от 3 до 5 км (рис. 4, а–б). В годы минимальной и максимальной встречаемости вихревых структур на акватории моря не происходит значительного изменения в характере

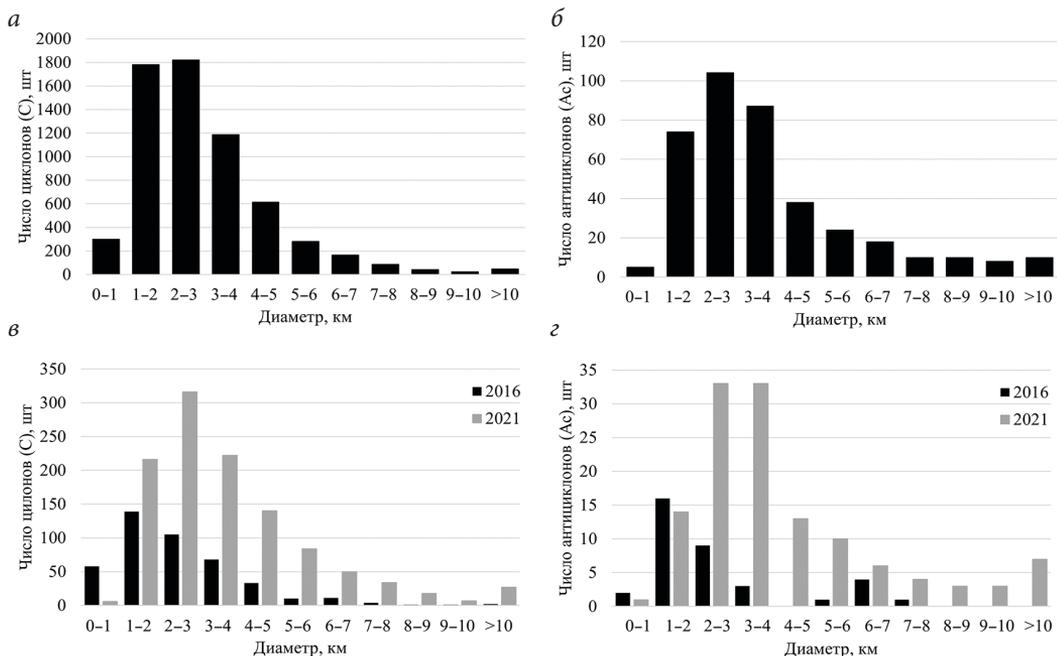


Рис. 4. Число и диаметры циклонических и антициклонических ППВ для всего периода исследования (а, б) и для годов с минимальным (черный цвет — 2016 г.) и максимальным (серый цвет — 2021 г.) числом проявлений (в, г)

распределения вихрей по диаметрам (рис. 4, в–г). Однако в период минимальной встречаемости (в 2016 г.) регистрируется большее число структур с меньшими диаметрами, чем в год максимального числа вихрей (в 2021 г.), что дает основание предполагать наличие различий в доминирующих механизмах их генерации за счет различия фоновых гидрометеорологических условий на акватории моря.

Анализ фоновых гидрометеорологических условий, представленный в табл. 1, подтверждает, что большое число ППВ в 2020–2021 гг. и малое в 2016 и 2019 гг. далеко не всегда соотносится с изменчивостью конкретного механизма (топографические эффекты, неустойчивость фронтальных зон) или процесса (трансформация поля завихренности ветровым воздействием), который может являться ведущей причиной их генерации на акватории. Так, например, в 2020–2021 гг. средняя скорость ветра была заметно ниже, чем в 2016 г, что, согласно (Лаврова и др., 2015; Журбас и др., 2017), позволяет отнести ветровое воздействие к одному из возможных механизмов возникновения вихрей. Однако большая скорость ветра могла повлиять на частоту регистрации ППВ на РЛИ (Атаджанова и др., 2022), что подтверждают количество дней в 2016 г, когда скорость ветра превышала 6 м/с. Анализ влияния ледовых условий также не дает однозначной оценки. Так, в 2017 и 2021 гг. наблюдалась большая площадь ледяного покрова, а в 2020 г. лед в Карском море практически отсутствовал, но при этом во все указанные годы число вихрей было значительным. Площадь ледяного покрова влияет на характеристики поверхностных вод Карского моря, отражением изменчивости которых является разница глубин залегания перемешанного слоя в области морских и речных вод (см. табл. 1). При этом его толщина в обоих регионах в целом не соответствует межгодовой изменчивости числа

Таблица 1. Количественные оценки ППВ

Год	С	АС	Всего	Средний диаметр, км			V, м/с	Day	S, тыс. км <sup>2</sup>	MLD, м	
				С	АС	Общий				A1	A2
2015	896	33	929	3.1	3.2	3.1	5.2	3	65	10.5	7
2016	432	36	468	2.5	2.7	2.5	6.3	7	70	12	8.4
2017	1014	27	1041	2.2	2.3	2.2	5.8	3	203	13.7	6.8
2018	902	67	969	3.3	4.2	3.4	5.8	3	15	10.6	10
2019	790	55	845	2.7	4	2.8	5.1	–	47	10	7.9
2020	1186	43	1229	2.7	3.4	2.8	5.2	–	25	11.1	8.8
2021	1120	127	1247	3.7	4.3	3.7	5	–	195	15	7.9

*Примечание.* В таблице обозначены: С — циклонические структуры; АС — антициклонические структуры; V — скорость ветра; Day — число дней, когда скорость ветра превышала 6 м/с; S — площадь ледяного покрова; MLD — толщина поверхностного слоя в морских (A1) и речных (A2) водах за августы с 2015 по 2021 г. в Карском море.

ППВ, хотя можно отметить тенденцию, когда при малой толщине поверхностного слоя в морских водах число вихрей уменьшается, а при большей — увеличивается (за исключением аномально интенсивного по силе ветра 2016 г.).

Минимальное количество ППВ (см. табл. 1) в Карском море регистрировалось в 2016 г. при большой величине приповерхностного ветра (> 6 м/с), что могло привести к ухудшению качества визуализации поверхностных пленок на РЛИ. Упомянутые условия могли способствовать регистрации вихрей меньших диаметров, которые имеют небольшое время существования. Максимальное же число ППВ в Карском море наблюдалось в 2021 г. при малой величине скорости ветра (5 м/с) в приводном слое атмосферы, который, видимо, сформировал условия их лучшей идентификации на РЛИ. Возможно, разница средних диаметров вихрей связана также с перепадом плотности в поверхностном слое за счет меньшей площади растаявшего льда в 2016 г. по сравнению с 2021 г. Важно отметить, что максимальное число вихрей и в 2016, и в 2021 г. регистрировалось над неоднородностями рельефа дна (Западно-Карская ступень) и в области СФЗ.

### 3.2. Влияние СФЗ на вихреобразование в Карском море

Анализ пространственной изменчивости среднего многолетнего положения СФЗ (см. рис. 2, б) показал, что область фронтальной зоны приурочена к большим значениям частоты встречаемости ППВ, средний показатель которой не опускается ниже 0.4–0.5. Наглядное представление о межгодовых оценках проявлений вихревых структур в СФЗ и основных параметрах фронтальной зоны можно получить из табл. 2.

Количественные оценки показали, что в периоды минимального числа проявлений вихрей в области СФЗ градиент ТПМ в августе максимальный, в то время как при малом числе ППВ во фронтальной зоне величина термического градиента уменьшается, а солёного, наоборот, возрастает. Важно отметить, что чаще всего малая площадь высокоградиентной области СФЗ совпадает с максимумом проявлений вихревых структур.

Таблица 2. Межгодовые характеристики вихревых структур и СФЗ за август

Характеристики	Год						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
$\nabla\bar{T}$ , °C/км	0.05	0.06	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03
$\nabla\bar{S}$ , PSU/км	0.09	0.12	0.10	0.09	0.11	0.11	0.11
$s$ , тыс. км <sup>2</sup>	155	80	99	158	96	87	56
Кол-во вихрей в СФЗ, % от общего числа вихрей в море	14	11	17	14	22	16	17
Повторяемость вихрей в СФЗ	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06	0.04	0.07

Примечание. В таблице обозначены:  $\nabla\bar{T}$  — градиент температуры поверхности моря;  $\nabla\bar{S}$  — градиент солености поверхности моря;  $s$  — площадь СФЗ.

Повторяемость вихрей в области СФЗ характеризуется общим трендом на ее увеличение. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что в период максимальной повторяемости ППВ в области СФЗ чаще наблюдается малая величина градиента температуры, площади СФЗ и большая величина градиента солености. Вероятно, перестройка термического режима Карского моря (Ruggieri et al., 2017; Osadchiev et al., 2022; Прохорова, 2022) приводит к ослаблению градиента температуры в области СФЗ в последние годы и интенсификации бароклинной неустойчивости в поверхностном слое (Пузина и др., 2021), что сказывается на увеличении числа ППВ.

### 3.3. Влияние приливной динамики на вихреобразование в Карском море

Анализ карты частоты повторяемости (см. рис. 3, б) позволил выявить район генерации ППВ в юго-западной части Карского моря в области неоднородностей рельефа дна. Для данной отдельно выделенной области был проведен анализ колебаний уровня с выделением сизигийного и квадратурного временного периодов на ближайшей к району измерительной станции Екатерининская гавань, а затем для каждого из выделенных периодов — оценка числа зарегистрированных ППВ

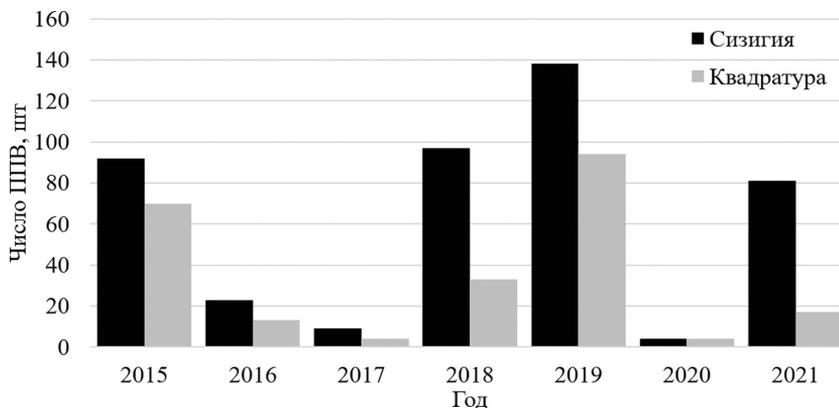


Рис. 5. Гистограмма многолетнего числа ППВ на РЛИ в районе их максимальной частоты в период сизигии (черный цвет) и квадратуры (серый цвет)

на РЛИ. Итоговая гистограмма числа ППВ в сизигийный и квадратурный циклы представлена на рис. 5.

В период сизигийного прилива, когда приливные течения имеют максимальные скорости, трансформируются под действием топографических неровностей дна и формируют значительные неоднородности в поле плотности, регистрируется максимальное число ППВ. В период же квадратуры, когда приливные скорости слабее, число неоднородностей и зарегистрированных вихрей на РЛИ уменьшается.

Резюмируя результаты анализа данных, стоит отметить, что на интенсивность вихреобразования в Карском море влияет сразу комплекс возможных причин, к главным из которых можно отнести воздействие ветра, неустойчивость, которая отмечается в области стоковой фронтальной зоны, и взаимодействие прилива с неровностями донной топографии над склоном шельфа.

#### 4. Выводы

В ходе работы для акватории Карского моря за период с 2015 по 2021 г. на основе данных РЛИ рассмотрены особенности пространственного распределения ППВ и возможные причины их генерации.

Всего было зарегистрировано 6728 вихрей, общий средний диаметр которых составил 2.9 км. Наименьшее число поверхностных проявлений регистрировалось в 2016 г. — 468 вихрей, а наибольшее в 2021 г. — 1247 вихрей. Во все годы число циклонических ППВ превалировало над антициклоническим, что соотносится с результатами исследований, выполненных ранее в других морях (Karimova and Gade, 2016, Атаджанова и др., 2017, Зимин, 2018, Зубкова и Козлов, 2020; Aleskerova et al., 2021, Атаджанова и др., 2022). Предполагается, что причинами доминирования циклонических субмезомасштабных вихрей являются нелинейный фронтогенез в деформационном поле, горизонтальная сдвиговая и бароклинная неустойчивости (Munk et al., 2000; McWilliams, 2016). Основные районы встречаемости ППВ расположены в юго-западной и центральной частях Карского моря, над свалами глубин западнее и северо-западнее п-ва Ямал, в области стоковой фронтальной зоны и вблизи устьев рек Оби и Енисея. Средние оценки диаметров вихрей варьировались от 2.2 до 4.7 км в месяц, что превосходит описанную ранее внутрисезонную изменчивость (Атаджанова и др., 2017). При этом антициклонические вихри были крупнее, что может приводить к их большему воздействию на вертикальную структуру вод и, вероятно, связано с их большей локальной величиной радиуса деформации (D'Hieres et al., 1989). Свыше 80 % зарегистрированных проявлений имели масштаб бароклинного радиуса Россби, что позволяет отнести их к субмезомасштабному интервалу изменчивости.

Ветровые условия в Карском море существенно влияют на количество и размеры детектируемых вихревых структур. Чаще всего малые вихри регистрируются при скорости ветра 5 м/с в развитом перемешанном слое толщиной более 10 м. При сильных ветрах значительной продолжительности уменьшалось не только количество зарегистрированных ППВ, но и их диаметр, что может говорить о процессах их диссипации под воздействием ветрового напряжения. При этом покрытие РЛИ и величина площади открытой воды сильно не повлияла на число вихрей в Карском море.

Значительное число проявлений детектируется в годы минимальных термохалинных градиентов в области СФЗ. Это дает основание полагать, что максимум встречаемости описываемых вихрей с диаметром порядка радиуса Россби связан с интенсификацией бароклинной неустойчивости в поверхностном слое.

Максимальное число вихревых структур в Карском море каждый год регистрировалось в области неоднородностей рельефа дна на краю шельфа (Западно-Карская ступень). Анализ приливной динамики показал частую встречаемость вихрей в период сизигии. Это дает возможность утверждать, что постоянно существующим механизмом генерации вихрей в Карском море является обтекание приливным течением топографических неоднородностей. Перечисленные возможные механизмы образования ППВ в Карском море характерны и для других регионов Мирового океана (Alpers et al., 2013; Dong et al., 2016; Атаджанова и др., 2017; Зубкова и др., 2020; Cassianides et al., 2021; Kozlov and Atadzhanova, 2022).

Таким образом, многолетний анализ ППВ показал, что причинами генерации вихрей в Карском море могут быть неустойчивость в области СФЗ и интенсификация приливного течения при обтекании неровностей донной топографии. Вихревые структуры в Карском море в безледный период чаще проявляются при слабых ветрах и являются распространенным явлением, что требует их учета при анализе динамики вод, распространении загрязнений и биогеохимических циклов. Полученные результаты могут быть использованы в задачах оперативной океанографии, рыболовства и учтены при планировании морских гидрологических и экологических исследований.

Следующие работы будут направлены на анализ вертикальной структуры вод по данным судовых наблюдений для оценки трехмерной геометрии и динамических характеристик малых вихрей в Карском море.

## Литература

- Артамонова, А. В., Козлов, И. Е., Осадчиев, А. А., Степанова, Н. Б. (2021). Вихри в Карском море на основе дистанционных и контактных измерений летом 2021 года. В: *Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. М.: ИКИ РАН. <https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>
- Атаджанова, О. А., Зимин, А. В., Круглова, К. А. (2022). Особенности поверхностных проявлений малых вихрей в Беринговом море в летний сезон по данным спутниковых радиолокационных изображений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 19 (3), 270–278. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278>
- Атаджанова, О. А., Зимин, А. В., Романенков, Д. А., Козлов, И. Е. (2017). Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений. *Морской гидрофизический журнал*, 2 (194), 80–90. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-2-80-90>
- Журбас, В. М., Кузьмина, Н. П., Лыжков, Д. А. (2017). Вихреобразование за мысом при генерации течения кратковременным воздействием вдольберегового ветра (численные эксперименты). *Океанология*, 57 (3), 389–399. <https://doi.org/10.7868/S0030157417020228>
- Зимин, А. В. (2018). *Субприливные процессы и явления в Белом море*. М.: ГЕОС.
- Зубкова, Е. В. и Козлов, И. Е. (2020). Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых РСА-наблюдений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 17 (4), 221–230. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230>
- Коник, А. А., Зимин, А. В., Атаджанова, О. А. (2022). Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века.

- Коник, А. А., Козлов, И. Е., Зимин, А. В., Атаджанова, О. А. (2020). Спутниковые наблюдения вихрей и фронтальных зон Баренцева моря в годы с различной ледовитостью. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 17 (5), 191–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201>
- Лаврова, О. Ю., Митягина, М. И., Сабинин, К. Д., Серебряный, А. Н. (2015). Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12 (5), 98–129.
- Прохорова, У. В. (2022). Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 68 (1), 64–75. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>
- Пузина, О. С., Кубряков, А. А., Мизюк, А. И. (2021). Сезонная и вертикальная изменчивость энергии течений в субмезомасштабном диапазоне на шельфе и в центральной части Черного моря. *Морской гидрофизический журнал*, 37 (1), 41–56. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-1-41-56>
- Aleskerova, A., Kubryakov, A., Stanichny, S., Medvedeva, A., Plotnikov, E., Mizyuk, A., Verzhvetskaya, L. (2021). Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements. *Ocean Dynamics*, 71, 655–677. <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01458-9>
- Alpers, W., Brandt, P., Lazar, A., Dagorne, D., Sow, B., Faye, S., Hansen, M., Rubino, A., Poulain, P.-M., Brethmer, P. (2013). A small-scale oceanic eddy off the coast of West Africa studied by multi-sensor satellite and surface drifter data. *Remote Sensing of Environment*, 129, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.032>
- 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*, 125, e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
- Cassianides, A., Lique, C., Korosov, A. (2021). Ocean eddy signature on SAR-derived sea ice drift and vorticity. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092066. <https://doi.org/10.1029/2020GL092066>
- D'Hieres, G. C., Davies, P. A., Didelle, H. (1989). Laboratory studies of pseudo-periodic forcing due to vortex shedding from an isolated solid obstacle in a homogeneous rotating fluid. *Elsevier Oceanography Series*, 50, 639–653. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70212-5](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70212-5)
- Dong, D., Yang, X., Li, X., Li, Z. (2016). SAR Observation of Eddy-Induced Mode-2 Internal Solitary Waves in the South China Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(11), 6674–6686. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2587752>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Bivavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, D., Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Karimova, S. S., and Gade, M. (2016). Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 37 (10), 2394–2414. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1145367>
- Kozlov, I. E. and Atadzhanova, O. A. (2022). Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter. *Remote Sensing*, 14 (134). <https://doi.org/10.3390/rs14010134>
- Kumar, A., Yadav, J., Mohan, R. (2021). Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara Sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications. *Science of The Total Environment*, 753, 142046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142046>
- Lee, J.-S. (1983). Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24 (2), 255–269. [https://doi.org/10.1016/0734-189x\(83\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0734-189x(83)90047-6)
- McWilliams, J. C. (2016). Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2189), 20160117. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0117>

- Mensa, J. A., Timmermans, M.-L., Kozlov, I. E., Williams, W. J., Özgökmen, T. (2018). Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 2635–2645. <https://doi.org/10.1002/2017JC013728>
- Munk, W., Armi, L., Fischer, K., Zachariassen, F. (2000). Spirals on the sea. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 456, 1217–1280. <http://doi.org/10.1098/rspa.2000.0560>
- Nurser, A. J. G. and Bacon, S. (2014). The Rossby radius in the Arctic Ocean. *Ocean Science*, 10, 967–975. <https://doi.org/10.5194/os-10-967-2014>
- Osadchiv, A. A., Frey, D. I., Shchuka, S. A., Tilinina, N. D., Morozov, E. G., Zavalov, P. O. (2020). Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016486. <https://doi.org/10.1029/2020jc016486>
- Osadchiv, A., Viting, K., Frey, D., Demeshko, D., Dzhamaeva, A., Nurlibaeva, A., Gordey, A., Krechik, V., Spivak, E., Semiletov, I., Stepanova, N. (2022). Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 915674. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.915674>
- Overland, J. E., Wang, M., Walsh, J. E., Stroeve, J. C. (2013). Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2, 68–74. <https://doi.org/10.1002/2013ef000162>
- Ruggieri, P., Kucharski, F., Buizza, R., Ambaum, M. H. P. (2017). The transient atmospheric response to a reduction of sea-ice cover in the Barents and Kara Seas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143 (704), 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/qj.3034>
- Spreen, G., Kaleschke, L., Heygster, G. (2008). Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels. *Journal of Geophysical Research*, 113, C02S03. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Thomas, L. N., Tandon, A., Mahadevan, A. (2008). Submesoscale processes and dynamics, Ocean Modeling in an Eddy Regime. *Geophysical Monograph Series*, 177, 17–38. <https://doi.org/10.1029/177GM04>
- Yamanouchi, T. and Takata, K. (2020). Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016). *Polar Science*, 25, 100548. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100548>

Статья поступила в редакцию 23 июня 2023 г.  
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Коник Александр Александрович — [konikrshu@gmail.com](mailto:konikrshu@gmail.com)  
Зимин Алексей Вадимович — [zimin2@mail.ru](mailto:zimin2@mail.ru)

## Long-term variability of surface manifestations of eddies in the Kara Sea\*

A. A. Konik<sup>1</sup>, A. V. Zimin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy pr., Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Konik, A. A., Zimin, A. V. (2024). Long-term variability of surface manifestations of eddies in the Kara Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 356–371. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.208> (In Russian)

The paper provides a quantitative assessment of the long-term variability of small eddies structures in the Kara Sea based on the analysis of Sentinel-1A/B satellite radar images from August 2015 to 2021. To compare the variability of the characteristics in different years, data on wind speed, ice area, and mixed layer thickness were used. During the specified period,

\* The study was carried out within the framework of the state task no. FMWE-2024-0028.

6340 surface manifestations of vortices were identified, with an average diameter of 2.9 km, predominantly cyclonic in rotation. The lowest number of surface manifestations was recorded in 2016–468 eddies, while the highest was in 2021–1247 eddies. It was found that the main areas of occurrence of manifestations are located in the southwest and central parts of the Kara Sea above the depths west and northwest of the Yamal Peninsula, as well as in the regions of the frontal drainage zone and the surface freshwater layer near the mouths of the Ob and Yenisei rivers. A significant prevalence of cyclonic eddies over anticyclonic ones is observed throughout the years, with their mean diameter ranging from 2.3 km in 2017 to 3.7 km in 2021. The variability in the number of registered eddies is presumably related to the influence of the intensity of wind stress in the atmospheric boundary layer on the sea surface. A significant portion of small eddies is registered at wind speeds of 5 m/s in the developed mixed layer with a thickness of more than 10 meters. It is shown that the most likely cause of eddy generation is the interaction of tides with the topographic irregularities of the seabed and baroclinic instability observed in the River Plume frontal zone.

*Keywords:* eddies, synthetic aperture radar, submesoscale, wind, tides, River Plume frontal zone, Kara Sea.

## References

- Aleskerova, A., Kubryakov, A., Stanichny, S., Medvedeva, A., Plotnikov, E., Mizyuk, A., Verzhevskaya, L. (2021). Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements. *Ocean Dynamics*, 71, 655–677. <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01458-9>
- Alpers, W., Brandt, P., Lazar, A., Dagorne, D., Sow, B., Faye, S., Hansen, M., Rubino, A., Poulain, P.-M., Brehmer, P. (2013). A small-scale oceanic eddy off the coast of West Africa studied by multi-sensor satellite and surface drifter data. *Remote Sensing of Environment*, 129, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.032>
- Artamonova, A. V., Kozlov, I. E., Osadchikov, A. A., Stepanova, N. B. (2021). Eddies in the Kara Sea based on remote and contact measurements in the summer of 2021. In: *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa»*. Moscow: IKI RAN Publ. <https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a> (In Russian)
- Atadzhanova, O. A., Zimin, A. V., Kruglova, K. A. (2022). Features of surface manifestations of small eddies in the Bering Sea in the summer season based on satellite radar images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 19 (3), 270–278. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278> (In Russian)
- Atadzhanova, O. A., Zimin, A. V., Romanenkov, D. A., Kozlov, I. E. (2017). Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*, 2, 75–83. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-75-83>
- 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*, 125, e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
- Cassianides, A., Lique, C., Korosov, A. (2021). Ocean eddy signature on SAR-derived sea ice drift and vorticity. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092066. <https://doi.org/10.1029/2020GL092066>
- D'Hieres, G. C., Davies, P. A., Didelle, H. (1989). Laboratory studies of pseudo-periodic forcing due to vortex shedding from an isolated solid obstacle in a homogeneous rotating fluid. *Elsevier Oceanography Series*, 50, 639–653. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70212-5](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70212-5)
- Dong, D., Yang, X., Li, X., Li, Z. (2016). SAR Observation of Eddy-Induced Mode-2 Internal Solitary Waves in the South China Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (11), 6674–6686. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2587752>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Bivavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Jani-

- sková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, D., Thépaut J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Karimova, S. S., and Gade, M. (2016). Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 37 (10), 2394–2414. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1145367>
- Konik, A. A., Kozlov, I. E., Zimin, A. V., Atadzhanova, O. A. (2020). Satellite observations of eddies and frontal zones in the Barents Sea during years of different ice cover properties, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 17 (5), 191–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201> (In Russian)
- Konik, A. A., Zimin, A. V., Atadzhanova, O. A. (2022). Spatial and temporal variability of the characteristics of the River Plume frontal zone in the Kara Sea in the first two decades of the XXI century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 15 (4), 23–41. <https://doi.org/10.48612/fpg/38mu-zda7-dpep>
- Kozlov, I. E. and Atadzhanova, O. A. (2022). Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter. *Remote Sensing*, 14 (134). <https://doi.org/10.3390/rs14010134>
- Kumar, A., Yadav, J., Mohan, R. (2021). Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara Sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications. *Science of The Total Environment*, 753, 142046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142046>
- Lavrova, O. Ju., Mitjagina, M. I., Sabinin, K. D., Serebrjanyj, A. N. (2015). Study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite data and subsatellite measurements. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2015, 12 (5), 98–129. (In Russian)
- Lee, J.-S. (1983). Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24 (2), 255–269. [https://doi.org/10.1016/0734-189x\(83\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0734-189x(83)90047-6)
- McWilliams, J. C. (2016). Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2189), 20160117. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0117>
- Mensa, J. A., Timmermans, M.-L., Kozlov, I. E., Williams, W. J., Özgökmen, T. (2018). Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 2635–2645. <https://doi.org/10.1002/2017JC013728>
- Munk, W., Armi, L., Fischer, K., Zachariasen, F. (2000). Spirals on the sea. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 456, 1217–1280. <http://doi.org/10.1098/rspa.2000.0560>
- Nurser, A. J. G. and Bacon, S. (2014). The Rossby radius in the Arctic Ocean. *Ocean Science*, 10, 967–975. <https://doi.org/10.5194/os-10-967-2014>
- Osadchiev, A. A., Frey, D. I., Shchuka, S. A., Tilinina, N. D., Morozov, E. G., Zavialov, P. O. (2020). Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016486. <https://doi.org/10.1029/2020jc016486>
- Osadchiev, A., Viting, K., Frey, D., Demeshko, D., Dzhamalova, A., Nurlibaeva, A., Gordey, A., Krechik, V., Spivak, E., Semiletov, I., Stepanova, N. (2022). Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 915674. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.915674>
- Overland, J. E., Wang, M., Walsh, J. E., Stroeve, J. C. (2013). Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2, 68–74. <https://doi.org/10.1002/2013ef000162>
- Prohorova, U. V. (2022). Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea. *Arctic and Antarctic research*, 68 (1), 64–75. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75> (In Russian)
- Puzina, O. S., Kubrjakov, A. A., Mizjuk, A. I. (2021). Seasonal and vertical variability of currents energy in the sub-mesoscale range on the Black Sea shelf and in its central part. *Physical Oceanography*, 28 (1), 38–51. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-1-41-56>
- Ruggieri, P., Kucharski, F., Buizza, R., Ambaum, M. H. P. (2017). The transient atmospheric response to a reduction of sea-ice cover in the Barents and Kara Seas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143 (704), 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/qj.3034>
- Spreen, G., Kaleschke, L., Heygster, G. (2008). Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels. *Journal of Geophysical Research*, 113, C02S03. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Thomas, L. N., Tandon, A., Mahadevan, A. (2008). Submesoscale processes and dynamics, Ocean Modeling in an Eddying Regime. *Geophysical Monograph Series*, 177, 17–38. <https://doi.org/10.1029/177GM04>

- Yamanouchi, T. and Takata, K. (2020). Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016). *Polar Science*, 25, 100548. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100548>
- Zhurbas, V.M., Kuz'mina, N. P., Lyzhkov, D. A. (2017). Eddy formation behind a coastal cape in a flow generated by transient longshore wind (Numerical experiments). *Oceanology*, 57 (3), 350–359. <https://doi.org/10.7868/S0030157417020228>
- Zimin, A. V. (2018). *Sub-tidal processes and phenomena in the White Sea*. Moscow: GEOS Publ., 220. (In Russian)
- Zubkova, E. V. and Kozlov, I. E. (2020). Characteristics of short-period internal waves in the Chukchi Sea based on spaceborne SAR observations. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 17 (4), 221–230. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230> (In Russian)

Received: June 23, 2023  
Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Aleksandr A. Konik — [konikrshu@gmail.com](mailto:konikrshu@gmail.com)

Aleksey V. Zimin — [zimin2@mail.ru](mailto:zimin2@mail.ru)