

ГЕНЕРАЦИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ВИХРЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИЛИВА ЗА МЫСАМИ ОСТРОВА НАДЕЖДЫ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

О. А. Атаджанова^{*1}, И. Е. Козлов¹, А. В. Зимин², А. А. Коник² и А. В. Медведева¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

* **Контакт:** Оксана Алишеровна Атаджанова, oksanam07@list.ru

Работа посвящена исследованию особенностей генерации и эволюции вихрей вблизи острова Надежды в Баренцевом море. В период с января по декабрь 2018 года на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений и данных оптических сканеров высокого пространственного разрешения было зарегистрировано 385 поверхностных проявлений вихревых структур вблизи острова Надежды. Из общего количества проявлений около 2/3 наблюдалось в холодный период года, когда в районе исследования наблюдался ледяной покров. Средний диаметр вихрей составил 4,5 км при общем диапазоне 0,3–17,3 км. При этом неоднократно встречались вихревые диполи. Вихри регистрировались в течение всего года, основная причина их генерации – обтекание приливными течениями мысов острова Надежды. Показано, что изменение направления приливного потока определяет знак вращения вихревой структуры и направление её движения. В зимний период вихревая динамика существенно влияет на ледовые условия вблизи острова, что приводит к смене положения кромки льда и формированию полыней в течение нескольких часов. В тёплый период года вихри отчётливо проявляются в данных оптических сканеров. Наличие последовательных спутниковых измерений позволяет проследить их эволюцию на малых пространственно-временных масштабах. Анализ спутниковых данных позволяет утверждать, что акватория вблизи острова Надежды является одним из ключевых районов интенсивного вихреобразования на шельфе Баренцева моря.

Ключевые слова: океанские вихри, остров Надежды, Баренцево море, дистанционное зондирование океана, спутниковая радиолокация морской поверхности, приливные течения, спутниковый оптический сканер, Арктика.

Цитирование: Атаджанова О. А., Козлов И. Е., Зимин А. В., Коник А. А., Медведева А. В. Генерация и эволюция вихрей под влиянием прилива за мысами острова Надежды в Баренцевом море // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES6018. — DOI: 10.2205/2025es001029 — EDN: AFFCRU

Введение

Образование вихрей – важная компонента циркуляции вод Мирового океана. Вихревые структуры вносят значимый вклад в процессы горизонтального и вертикального обмена и, следовательно, формируют локальные особенности гидрологической структуры вод [Каменкович и др., 1987]. Вихревые структуры имеют различные пространственные и временные характеристики и формируются благодаря разным механизмам [Костяной и др., 2018; Payandeh et al., 2023]. Это бароклинно-баротропная неустойчивость в области границ течений и фронтальных зон, топографические эффекты при обтекании подводных гор и островов, пространственно-неоднородное ветровое воздействие, приливная динамика [Гинзбург, 1992; Payandeh et al., 2023]. В настоящее время благодаря развитию дистанционных методов исследования океана из космоса и математического моделирования наибольший интерес представляет изучение вихрей с пространственным масштабом от сотен метров до первого десятка километров. На спутниковых изображениях они, как правило, имеют «спиралевидную» форму [Гинзбург, 1992; Munk et al., 2000]. Малое время жизни и небольшой пространственный масштаб по спутниковым наблюдениям позволяют, как правило, формировать представления только об их геометрических характеристиках на поверхности [Atadzhanova et al.,

<https://elibrary.ru/AFFCRU>

Получено: 10 января 2025 г.

Принято: 19 июня 2025 г.

Опубликовано: 30 декабря 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

2018; Karimova, 2012], но при наличии последовательных спутниковых изображений реализуется возможность получить и динамические параметры [Kozlov et al., 2020]. Основная сложность при их моделировании заключается в том, что они не описываются полностью положениями квазигеострофической теории [Thomas et al., 2008], и, кроме того, сведения об особенностях их генерации и эволюции носят крайне отрывочный характер, особенно в Арктике.

Согласно Зимин [2018], в арктических морях в качестве триггерного (приводящего в действие) механизма, запускающего каскад передачи энергии от процессов мезомасштаба к микроструктуре, могут выступать приливы. Приливные процессы, повторяющиеся регулярно, являются своеобразным генератором вертикального и горизонтального движения водных масс и соответственно стимулируют процессы обмена во взаимодействии со стратификацией вод и топографией дна.

Ранее в работах [Atadzhanova and Zimin, 2019; Atadzhanova et al., 2017, 2018] было показано, что малые (субмезомасштабные) вихревые структуры являются распространённым явлением в Баренцевом море. Они имеют характерный пространственный масштаб 2–4 км, часто встречаются к юго-востоку от острова Западный Шпицберген, а одной из наиболее частых причин их генерации могут выступать топографические эффекты (в районах неровностей дна), развивающиеся под влиянием приливных процессов.

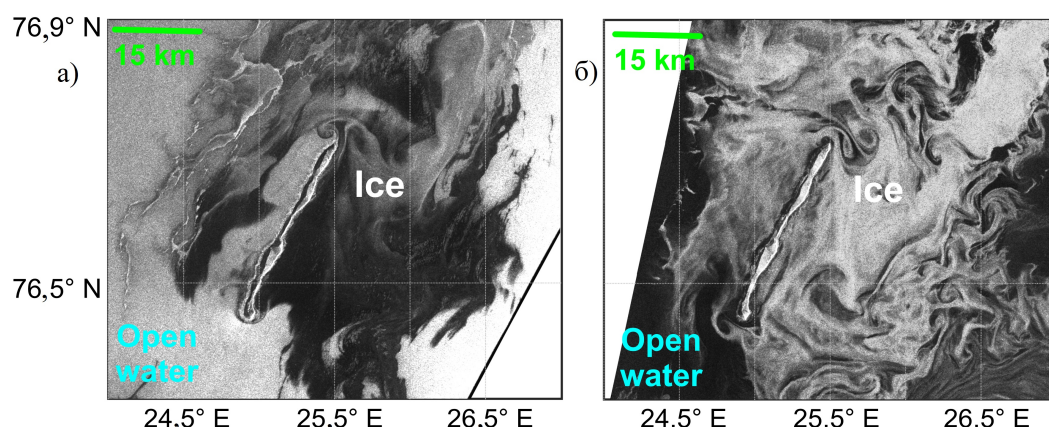


Рис. 1. Фрагменты спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 с примерами образования вихрей вблизи острова Надежды за а) 11 февраля 2018 г. 05:59 UTC; б) 12 февраля 2018 г. 05:01 UTC, показывающие примеры проявления вихрей на последовательных радиолокационных изображениях (рисунок из статьи [Atadzhanova et al., 2024]).

Юго-восточнее архипелага Шпицберген располагается небольшой о. Надежды, вблизи которого неоднократно по спутниковым радиолокационным изображениям (РЛИ) регистрировались проявления вихревых структур, при этом в зимний период чаще [Kozlov and Atadzhanova, 2022], чем в летний [Atadzhanova and Zimin, 2019]. Остров является вытянутым, его протяжённость составляет около 33 км, а самое широкое место – около 2 км. В качестве особенностей района можно отметить небольшие глубины (преимущественно менее 50 м), сезонный ледяной покров, ярко выраженные полусуточные приливы с большими скоростями течений (около 1 м/с). Под влиянием приливов и топографии вокруг острова формируется локальная циркуляция [Kowalik and Marchenko, 2023]. Аналитические и численные расчёты [Marchenko and Kowalik, 2023] показывают, что на шельфе вокруг острова в поле уровня моря образуется дипольная структура, вращающаяся по часовой стрелке. При этом около южного и северного мысов острова формируются вихри, которые смещаются от берега в сторону открытой воды. Это оказывает существенное влияние на изменчивость характеристик вод и ледяного покрова на масштабе порядка суток (рис. 1). Как видно из рисунка, за одни сутки общая картина вихревого поля существенно изменилась. Поэтому целью данной работы является исследование особенностей генерации и эволюции вихрей вблизи мысов острова Надежды в Баренцевом море по данным спутниковых наблюдений и приливной модели с января по декабрь 2018 г.

Исходные данные и методы исследований

Для изучения процессов вихреобразования и дальнейшей эволюции вихрей вблизи острова Надежды в Баренцевом море в течение года использовались спутниковые РЛИ, полученные прибором SAR-C на борту спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в январе – декабре 2018 г. Эти данные находятся в открытом доступе на сайте Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu>, дата обращения: 1 апреля 2023 г.). Всего было проанализировано 443 РЛИ, полученных в режимах съёмки Interferometric Wide (IW) с пространственным разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км и Extra-Wide Swath (EW) с пространственным разрешением 40 м и шириной полосы обзора 400 км. В среднем за каждый месяц для района исследований было доступно около 35 РЛИ. Временной интервал между ближайшими радиолокационными съёмками был различным: около 50 минут, около 10 часов, около суток и каждые двое суток.

На РЛИ поверхностные проявления вихревых структур в открытой воде (ОВ) формируются при взаимодействии коротких ветровых волн с полем поверхностных течений и фоновых поверхностных плёнок; а проявления вихрей в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) – за счёт горизонтального перераспределения мелкобитого дрейфующего льда под влиянием вихревых течений [Gade et al., 2013; Johannessen et al., 1987, 1996; Kozlov et al., 2019].

Дополнительно привлекались оптические спутниковые изображения высокого пространственного разрешения OLI Landsat-8 (с пространственным разрешением 15 и 30 м) и MSI Sentinel-2 (с пространственным разрешением 10 м), которые были получены из баз данных Copernicus Space Data Ecosystem (CDSE) Portal (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>, дата обращения: 06.08.2024) и USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>, дата обращения: 06.08.2024) соответственно. Поскольку облачный покров является непроницаемым для оптических сенсоров, поиск относительно безоблачных сцен позволил отобрать 116 снимков MSI Sentinel-2 и 21 снимок OLI Landsat-8. Границы сцен MSI Sentinel-2 пролегли по центральной части острова, поэтому соседние сцены объединялись в пары для полного охвата района исследования. Таким образом, было сформировано 58 пар изображений, целиком покрывающих остров и прилегающие области. Сцены OLI Landsat-8, как правило, полностью охватывали район исследования, но в одном случае также выполнялось объединение соседних сцен.

В зависимости от различных внешних условий (сезона и интенсивности облачного покрова) оптические снимки преобразовывались в среде Sentinel Application Platform (SNAP) в RGB-композиции в псевдонатуральных цветах или в изображения с минимизированной рассеянной либо отражённой компонентой. В первом случае для более чёткого отслеживания изменений шероховатости морской поверхности и льда использовался канал из ближнего инфракрасного диапазона. Во втором случае для более выраженного проявления взвешенного вещества, являющегося трассером вихрей и течений, и для частичного устранения облачного покрова (облаков с высокой или умеренной степенью прозрачности) рассчитывалась разность каналов в зелёном (длина волны 560 нм для обоих сенсоров) и ближнем инфракрасном (705 нм для MSI Sentinel-2 и 865 нм для OLI Landsat-8) диапазонах электромагнитного спектра.

Идентификация проявлений вихревых структур на радиолокационных и оптических изображениях (ОИ) выполнялась на основе визуального анализа данных, аналогично методикам, приведённым в работах [Atadzhanova and Zimin, 2019; Bashmachnikov et al., 2020; Karimova, 2012; Kozlov et al., 2019], а их диаметры определялись исходя из размеров эллипса, описывающего спиралевидную структуру вихревых проявлений. Для каждого проявления отмечались координаты центра, диаметр (как среднее между большим и малым диаметрами эллипса) и тип вращения (спираль, закрученная против часовой стрелки, принималась за проявление вихря с циклоническим типом вращения, С, а закрученная по часовой стрелке — с антициклоническим, Ас).

Для привязки моментов наблюдения вихрей в спутниковых данных к фазам приливного цикла вблизи северной и южной оконечностей острова использовались данные о ходе приливного уровня и скоростях приливных течений из модели Arc2kmTM_v1 [Howard and Padman, 2021], имеющей пространственное разрешение 2 км. Неоднократно

имели место случаи, когда временной интервал между последовательными РЛИ и ОИ, на которых регистрировались вихри, составлял около 6 часов, что позволяло их отнести к разным фазам суммарного полусуточного прилива лунной и солнечной гармоник ($M_2 + S_2$).

Ежечасные данные о скорости и направлении ветра были получены из реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>, дата обращения: 02.02.2024) с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Результаты и обсуждение

Пространственно-временная изменчивость вихрей с января по декабрь 2018 г.

Анализ радиолокационных и оптических изображений позволил зарегистрировать 385 поверхностных проявлений вихрей вблизи острова Надежды (рис. 2а), из которых менее 10% могут потенциально являться повторяющимися проявлениями одних и тех же вихрей ввиду небольшого (до 1 часа) временного интервала между спутниковыми измерениями. Вихри отмечались преимущественно у северного и южного мысов острова, реже ближе к его центральной части (рис. 2а). Среди вихрей отмечалось значительное преобладание циклонических вихрей, они же согласно данным визуального анализа распространялись на большее расстояние от мест их образования вблизи мысов. Преобладающее направление перемещения вихрей было западным (восточным) у южного (северного) мыса, что совпадает с направлением вращения приливных эллипсов по часовой стрелке. Кроме того, в отдельных случаях вблизи северного мыса острова Надежды отмечались цепочки последовательных вихрей.

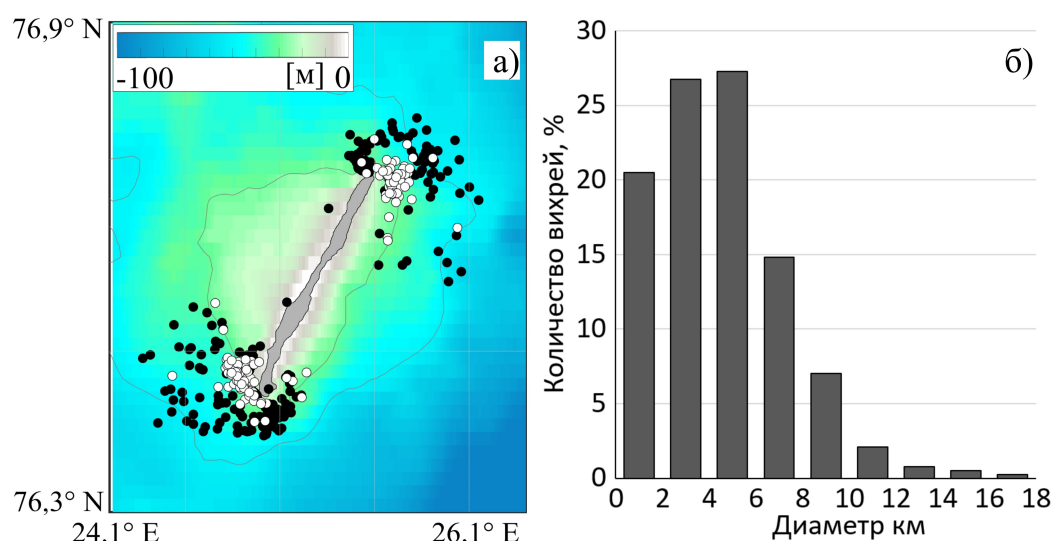


Рис. 2. Пространственное распределение центров поверхностных проявлений вихрей а) и гистограмма распределения количества вихрей в зависимости от их диаметров б) с 1 января по 31 декабря 2018 г. На а) чёрные круги – циклонические вихри, белые – антициклонические, серые линии – изобаты 30 и 50 м.

Средний диаметр всех зарегистрированных вихревых проявлений составил 4,5 км, при этом преобладающее большинство вихрей (3/4 проявлений) имело диаметр до 6 км (рис. 2б).

Для разделения результатов на периоды воспользуемся тем, что в Баренцевом море период ледообразования наблюдается с октября по апрель, а ледотаяния и очищения ото льда – с мая по сентябрь [Думанская, 2021]. Рассмотрим эти два периода для 2018 г. в контексте регистрации поверхностных проявлений вихрей отдельно на РЛИ и ОИ (табл. 1). Несмотря на то, что по РЛИ вихревые проявления регистрировались в течение всего года, в большей степени они отмечались в период наличия ледяного покрова в Баренцевом море с января по апрель и с октября по декабрь 2018 г., пик

наблюдений приходится на январь-февраль 2018 г. В итоге результаты анализа спутниковых РЛИ содержат преимущественно информацию о вихрях ПЛЗ, которых было зарегистрировано почти в 20 раз больше, чем вихрей открытой воды (табл. 1). Как правило, среднее значение диаметров вихрей ПЛЗ было на 1,5 км больше, чем для вихрей ОВ.

В период наличия льда относительно безоблачных ОИ было почти в 10 раз меньше, чем РЛИ. На малооблачную погоду, когда была видна акватория вблизи одного или обоих мысов, пришлось всего 22 ОИ в марте и апреле 2018 г., в которых, из-за наличия большого количества льда, регистрировались только вихри ПЛЗ. Среднее значение диаметра вихрей ПЛЗ по данным оптического диапазона (5,6 км) было близко к аналогичному по данным РЛИ (5,3 км).

В период с мая по сентябрь как по РЛИ, так и по ОИ вихри ПЛЗ регистрировались гораздо реже (табл. 1), поскольку к середине мая 2018 г. район очистился ото льда. В этот же период вихрей ОВ по оптическим данным было зарегистрировано почти в 5 раз больше, чем по радиолокационным данным, несмотря на то, что количество РЛИ за этот период было в 3 раза выше, чем ОИ. В тёплый период года наибольшая встречаемость вихрей регистрировалась в июне, когда количество ОИ с малой облачностью было максимальным.

Таблица 1. Характеристики вихревых проявлений прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) и открытой воды (ОВ), зарегистрированных на спутниковых радиолокационных (РЛИ) и оптических (ОИ) изображениях

Период	Изображения	Кол-во изображений, шт.	Тип проявления	Кол-во проявлений, шт.	Средний диаметр, км
октябрь–апрель	РЛИ	260	ПЛЗ	188	5,3
			ОВ	9	3,7
	ОИ	22	ПЛЗ	32	5,6
			ОВ	–	–
май–сентябрь	РЛИ	183	ПЛЗ	22	3,8
			ОВ	17	4,1
	ОИ	56	ПЛЗ	12	5,2
			ОВ	105	2,9

Для периода с мая по сентябрь проводилось сопоставление количества изображений, на которых было зарегистрировано минимум одно проявление вихря ОВ, с часовыми скоростями приводного ветра по данным ERA5. При значительно большем общем количестве РЛИ за этот период количество ОИ с наличием вихревых структур превалирует практически во всех интервалах скорости ветра (до 14 м/с), за исключением скоростей от 2 до 4 м/с. При скоростях ветра более 8 м/с вихри регистрировались только по ОИ.

Вихревые проявления прикромочной ледовой зоны

Вихри ПЛЗ регистрировались с января по середину мая и в декабре, когда вблизи острова отмечался лёд. Всего было зарегистрировано 254 проявления вихрей ПЛЗ, из них 210 структур на РЛИ, 44 – на ОИ. Циклонов было в 2 раза больше, чем антициклонов. К северу от острова вихрей ПЛЗ было 99 проявлений, при этом в основном одиночные вихри, в то время как к югу в 1,5 раза больше – 155 проявлений, чаще всего – диполи. Средний диаметр был схожим – 5 км против 5,3 км с максимальными размерами 15,3 км против 17,3 км.

Для выявления связи образования вихрей с приливом моменты регистрации вихрей были сопоставлены с приливным ходом уровня и скоростями приливных течений. На рис. 3 представлены примеры проявления вихрей ПЛЗ у северной оконечности острова в РЛИ (а, г) и ОИ (б, в, д) за 2–3 мая 2018 г., а также поля скорости и направления

приливных течений за те же моменты времени (е–к). Из графика хода приливного уровня видно, что вихри вблизи мыса регистрировались во все фазы прилива. При этом ближе к окончанию фазы прилива к востоку от мыса видны ранее сформировавшиеся антициклоны (а, в, г), а в фазу окончания отлива (в, е) к западу от него регистрируются циклоны. Такая разнонаправленность связана с обтеканием северной оконечности острова приливной волной, что видно из приведённых карт приливных течений. В период прилива течение преимущественно направлено на восток, а в отлив – на запад.

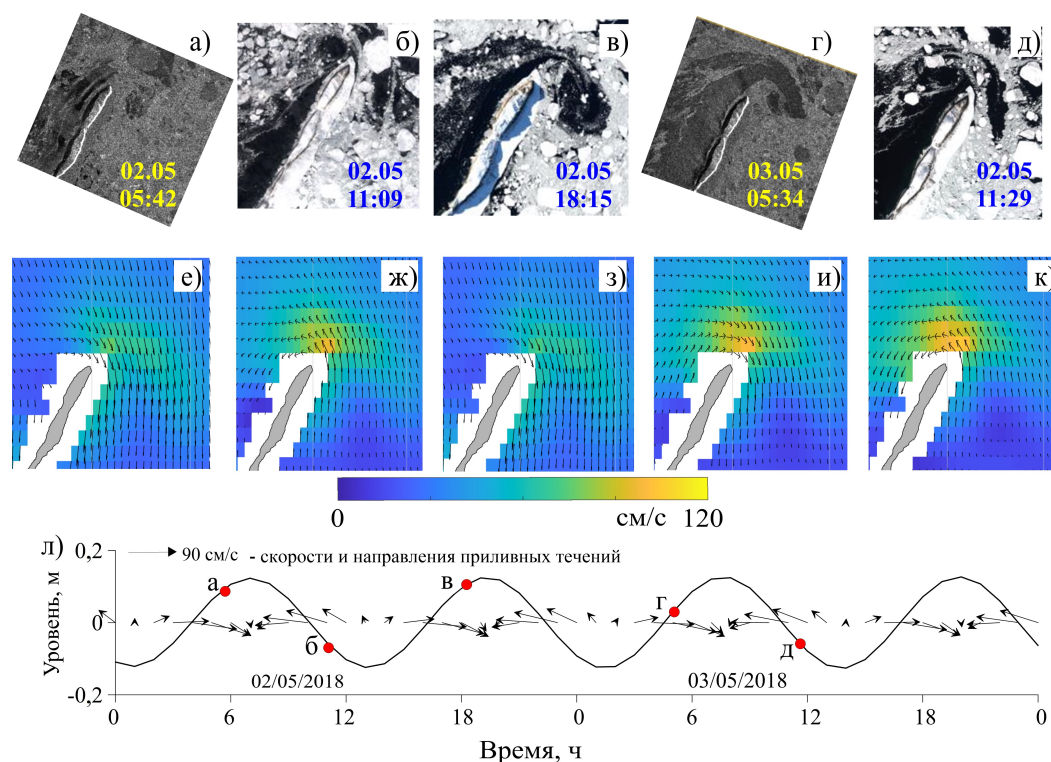


Рис. 3. Эволюция вихрей вблизи северного мыса острова Надежды за 2–3 мая 2018 г., на которых регистрировались проявления вихрей: а) 02.05.2018 05:42 UTC; б) 02.05.2018 11:09 UTC; в) 02.05.2018 18:15 UTC; г) 03.05.2018 05:34 UTC; д) 03.05.2018 11:29 UTC; е–к) поля скорости и направления приливных течений за те же моменты времени; л) график изменения приливного уровня и направлений приливных течений в точке к северу от мыса с 00:00 UTC 2 мая по 00:00 UTC 4 мая. Красными маркерами отмечены моменты получения спутниковых изображений.

Далее рассмотрим более детально один из примеров для вихрей ПЛЗ вблизи южной оконечности острова Надежды, позволивший оценить эволюцию вихрей в течение полного приливного цикла. Для наглядности были взяты спутниковые изображения за разные даты, относящиеся к разным фазам приливного цикла (рис. 4).

Фрагменты б и л на рис. 4 относятся к началу прилива, когда сформировавшийся ранее в период отливных течений восточного направления (д, е) циклонический вихрь находился к юго-востоку от мыса. При постепенном развороте приливных течений по часовой стрелке на запад (е, ж) происходит деформация и перемещение вихревой структуры и ледяного поля в этом же направлении (в, г). При этом в силу горизонтального сдвига скорости, образующегося за счёт огибания приливным потоком западного направления мыса (ж) над наклонным дном, исходная вихревая структура трансформируется в вихревой диполь (г).

В начале отлива при течении на северо-северо-запад (м) антициклоническая часть диполя прижимается к юго-западному побережью острова Надежды, а его циклоническая часть растёт по мере удаления от острова (з). Этот процесс продолжается и далее в период отлива при течениях (н), направленных на север, при этом антициклонический вихрь сильно вытягивается вдоль южной части острова (и). Далее в конце отлива

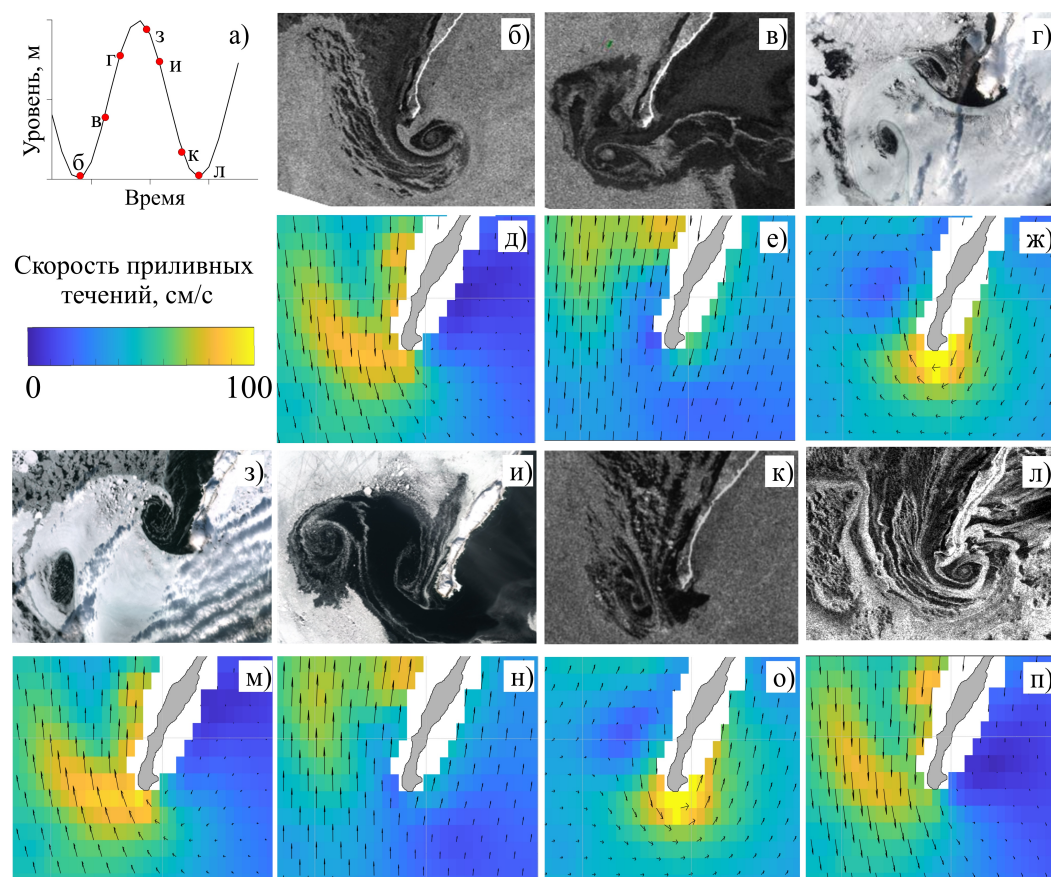


Рис. 4. Эволюция вихрей вблизи южного мыса острова Надежды в течение приливного периода. Общий график приливного уровня а), где красными маркерами отмечены моменты получения спутниковых изображений, на которых регистрировались проявления вихрей, на б–п) представлены фрагменты изображений и поля приливных скоростей: б, д) 03.04.2018 05:33 UTC; в, е) 15.04.2018 05:33 UTC; г, ж) 06.04.2018 11:39 UTC; з, м) 03.04.2018 11:29 UTC; и, н) 15.04.2018 11:19 UTC; к, о) 06.04.2018 05:09 UTC; л, п) 04.03.2018 05:34 UTC.

вблизи мыса снова начинает формироваться диполь (к), антициклоническая часть которого является частью ранее сформированного диполя, а циклоническая часть – новое возмущение, формирующееся под влиянием отливного течения, направленного на восток (о). Как видно из рис. 4, эволюция вихревых структур в ходе приливного цикла приводит к существенным изменениям сплочённости морского льда вокруг острова, периодическому формированию полыней и обширных участков открытой воды в зимний период.

Вихревые проявления открытой воды

Вихри открытой воды регистрировались с мая по ноябрь 2018 г. Всего вблизи острова было отмечено 131 проявление со средним диаметром около 3 км, при этом циклонов было в 1,5 раза больше, чем антициклонов. На ОИ зарегистрировано 105 проявлений, тогда как на РЛИ всего 26. К северу от острова – 76 проявлений, к югу – 55.

В летний период интенсивное вихреобразование вблизи острова может быть важным процессом горизонтального и вертикального переноса взвеси и других биогеохимических элементов на шельфе Шпицбергенской банки. На рис. 5 и 6 показаны примеры формирования вихревых структур вблизи южного и северного мысов острова Надежды по данным оптических сканеров Landsat-8 и Sentinel-2.

Большее количество вихрей к северу от острова вероятно связано с частым формированием сложной вихревой структуры, состоящей из крупного циклонического возмущения с цепочкой небольших циклонов на его периферии (рис. 5). Подобные структуры регистрировались только в оптических данных и всегда в середине отлива (рис. 5 а–г), когда приливные течения огибали мыс с востока на запад. При этом,

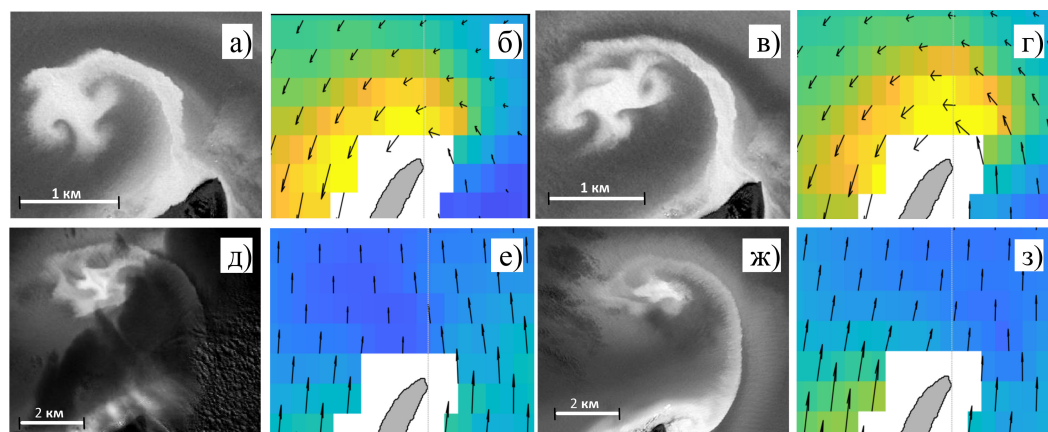


Рис. 5. Фрагменты ОИ за 03.07.2018 10:59 UTC (а) и 11:49 UTC (д) и 27.06.2018 10:56 UTC (в) и 11:29 UTC (ж), а также графики хода уровня (линия) и скоростей (стрелки) приливных течений за соответствующие моменты времени (б, г, е, з).

когда происходила смена направления и течения были направлены на север в конце отлива и начале прилива, такие структуры деформировались и разрушались (рис. 5 д–з). Когда течения меняют своё направление на восточное, начинают формироваться одиночные антициклонические вихри и реже диполи к востоку от острова.

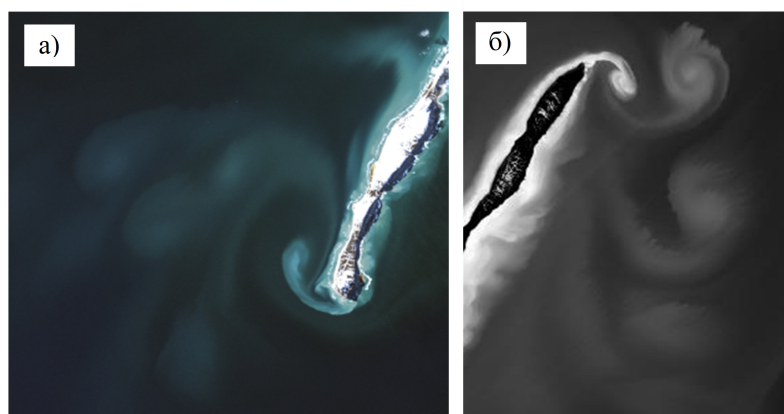


Рис. 6. Фрагменты оптических спутниковых изображений Landsat-8 за 07.06.2018 17:50 UTC (а) и Sentinel-2A за 22.06.2018 11:29 UTC (б).

По ОИ также отмечались и когерентные проявления вихрей ОВ на некотором расстоянии от обоих мысов. Для примера на рис. 6 представлены фрагменты ОИ. Видно, что вблизи самого острова наблюдаются яркие области взмученных вод, которые распространяются далее на шельфе под влиянием вихрей с каждым приливным циклом. На рис. 6а к западу от южного мыса острова Надежды чётко прослеживается антициклон. При этом северо-западнее и юго-западнее него наблюдаются менее выраженные циклоны, которые по всей видимости сформировались в предыдущие приливные циклы к востоку от мыса и были отнесены отливным течением на запад. На рис. 6б отмечается схожая ситуация. К востоку от северного мыса отчётливо виден вихревой диполь. Южнее него наблюдаются следы ещё трёх циклонических вихрей, проявления которых заметно ослабевают с расстоянием от мыса. Оба представленных изображения были получены за сутки до квадратурного прилива, когда скорости приливных течений были относительно невелики и не превышали 50 см/с. Предположительно именно малые скорости приливных течений позволили вихревым проявлениям сохраниться на протяжении нескольких приливных циклов.

Заключение

Анализ спутниковых радиолокационных и оптических изображений с января по декабрь 2018 г. вблизи острова Надежды в Баренцевом море позволил зарегистрировать 385 поверхностных проявлений вихрей на участках открытой воды и в прикромочной ледовой зоне. Показано, что вихри образуются к северу и югу от острова в течение всего года.

Вихри ПЛЗ регистрируются чаще всего в январе и феврале. Под воздействием течений восточного направления (при смене знака приливных течений с отлива на прилив) у южной оконечности острова к востоку от него образуется циклонический вихрь, структура которого деформируется при смене направления приливных течений. При течениях западного направления (перестройка с прилива на отлив) к востоку от острова формируется диполь. При меньшем количестве доступной информации аналогичные процессы регистрировались и вблизи северной оконечности острова. При течениях восточного направления к северо-востоку от острова образуется антициклон, а при течениях западного направления к северо-западу от острова образуется циклон.

Анализ спутниковых РЛИ за 2018 г. подтвердил более ранние результаты о том, что район острова Надежды характеризуется относительно низкой встречаемостью вихрей в Баренцевом море по данным радиолокационной съёмки в тёплый период [Atadzhanova and Zimin, 2019]. В то же время использование данных оптического диапазона при малооблачной погоде показало, что вихри вблизи острова регистрируются на всех доступных ОИ, как в тёплый, так и холодный периоды года, т. е. и на участках открытой воды, и в прикромочной ледовой зоне. Важно отметить, что при скоростях приводного ветра более 8 м/с вихри ОВ в тёплый период регистрировались только по оптическим данным.

Интересной особенностью вихреобразования у северной оконечности острова в летний период является образование крупных циклонов со множеством более мелких циклонов на их периферии. Подобные структуры образуются при течениях западного направления и быстро разрушаются при смене знака приливных течений. При восточных течениях наблюдается противоположная картина с формированием антициклонов к северо-западу от острова.

Согласно данным спутниковых наблюдений, образование новых вихрей вблизи острова Надежды происходит каждый приливной цикл при обтекании его мысов приливным потоком переменного знака. Часть образуемых вихрей подвержена деформации и диссипации, а некоторые из них могут переноситься в противоположную сторону при смене направления течений на значительные расстояния (до 19 км) от мысов. Поверхностные проявления таких вихрей могут наблюдаться в течение нескольких приливных циклов.

Таким образом, совместный анализ спутниковых радиолокационных и оптических изображений высокого пространственного и временного разрешения позволил оценить не только их горизонтальные характеристики и районы образования вблизи острова Надежды, но также и выявить особенности их эволюции во времени и пространстве под влиянием знакопеременных приливных течений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания МГИ РАН № FNNN-2024-0017 «Комплексные исследования гидрофизических процессов в полярных районах Мирового океана на основе мультисенсорных дистанционных и контактных измерений».

Список литературы

- Гинзбург А. И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология. — 1992. — Т. 32, № 6. — С. 997—1004.
- Думанская О. И. Закономерности и особенности ледовых условий Баренцева моря во второй половине XX – начале XXI века // Система Баренцева моря. — М. : ГЕОС, 2021. — С. 179—194. — [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(15\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(15)).
- Зимин А. В. Субприливные процессы и явления в Белом море. — М. : ГЕОС, 2018. — 220 с.
- Каменкович В. М., Кошляков М. М. и Монин А. С. Синоптические вихри в океане. — Л. : Гидрометеиздат, 1987. — 511 с.

- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лаврова О. Ю. и др. Дистанционное зондирование субмезомасштабных вихрей в морях России // Сборник трудов Международного симпозиума «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере». — М. : ИО РАН, 2018. — С. 184–187. — <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-4-1-2018-52>.
- Atadzhanova O. A., Kozlov I. E. and Konik A. A. Eddies over Spitsbergen bank in the Barents Sea from year-round Sentinel-1 SAR Observations // Preprint. — 2024. — <https://doi.org/10.20944/preprints202405.0235.v1>.
- Atadzhanova O. A. and Zimin A. V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // Fundamental and Applied Hydrophysics. — 2019. — Vol. 12, no. 3. — P. 36–45. — <https://doi.org/10.7868/s2073667319030055>.
- Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., et al. Satellite Radar Observations of Small Eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. — 2017. — No. 2. — P. 75–83. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2017-2-75-83>.
- Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Svergun E. I., et al. Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea // Physical Oceanography. — 2018. — Vol. 25, no. 3. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2018-3-220-228>.
- Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., et al. 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, no. 7. — <https://doi.org/10.1029/2019jc015832>.
- Gade M., Byfield V., Ermakov S., et al. Slicks as Indicators for Marine Processes // Oceanography. — 2013. — Vol. 26, no. 2. — P. 138–149. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.39>.
- Howard S. L. and Padman L. Arc2kmTM: Arctic 2 kilometer Tide Model, 2021. — 2021. — <https://doi.org/10.18739/A22N4ZK5G>.
- Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., et al. Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6754–6772. — <https://doi.org/10.1029/jc092ic07p06754>.
- Johannessen J. A., Shuchman R. A., Digranes G., et al. Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1996. — Vol. 101, no. C3. — P. 6651–6667. — <https://doi.org/10.1029/95jc02962>.
- Karimova S. S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // Advances in Space Research. — 2012. — Vol. 50, no. 8. — P. 1107–1124. — <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>.
- Kowalik Z. and Marchenko A. Tidal Motion Enhancement on Spitsbergen Bank, Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2023. — Vol. 128, no. 1. — <https://doi.org/10.1029/2022jc018539>.
- Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., et al. Eddies in the Western Arctic Ocean From Spaceborne SAR Observations Over Open Ocean and Marginal Ice Zones // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2019. — Vol. 124, no. 9. — P. 6601–6616. — <https://doi.org/10.1029/2019jc015113>.
- Kozlov I. E. and 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, no. 1. — <https://doi.org/10.3390/rs14010134>.
- Kozlov I. E., Plotnikov E. V. and Manucharyan G. E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // The Cryosphere. — 2020. — Vol. 14, no. 9. — P. 2941–2947. — <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.
- Marchenko A. and Kowalik Z. Tidal Wave-Elliptic Island Interaction above the Critical Latitude // Journal of Physical Oceanography. — 2023. — Vol. 53, no. 3. — P. 683–698. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-22-0018.1>.
- Munk W., Armi L., Fischer K., et al. Spirals on the sea // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2000. — Vol. 456, no. 1997. — P. 1217–1280. — <https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0560>.
- Payandeh A. R., Washburn L., Emery B., et al. The Occurrence, Variability, and Potential Drivers of Submesoscale Eddies in the Southern California Bight Based on a Decade of High-Frequency Radar Observations // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2023. — Vol. 128, no. 10. — <https://doi.org/10.1029/2023jc019914>.
- Thomas L. N., Tandon A. and Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime. — 2008. — P. 17–38. — <https://doi.org/10.1029/177gm04>.

GENERATION AND EVOLUTION OF EDDIES UNDER THE INFLUENCE OF THE TIDE BEHIND THE CAPES OF HOPEN ISLAND IN THE BARENTS SEA

O. A. Atadzhanova^{*}, I. E. Kozlov¹, A. V. Zimin², A. A. Konik², and A. V. Medvedeva¹

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

****Correspondence to:** Oksana Atadzhanova, oksanam07@list.ru

This study investigates the generation and evolution of eddies near Hopen Island in the Barents Sea. Based on high-resolution satellite radar imagery and optical scanner data, 385 surface manifestations of eddy structures were identified between January and December 2018. Approximately two-thirds of these manifestations were observed during the cold season, coinciding with the presence of sea ice in the study region. The average eddy diameter was 4.5 km, ranging from 0.3 to 17.3 km. The eddies were detected year-round, and dipole eddies were frequently observed. The primary mechanism driving their generation is the interaction of tidal currents with the capes of Hopen Island. Notably, the direction of tidal flow determined both the rotational sense of the eddy structures and their trajectories. Eddy dynamics exerted significant influence on ice conditions during winter, altering the position of the ice edge and inducing polynya formation within hours. During the warm season, eddies were particularly conspicuous in high-resolution optical scanner imagery. The availability of consistent satellite measurements enabled detailed tracking of eddy evolution across fine spatial and temporal scales. The analysis highlights that the area around Hopen Island is a region of intense eddy generation on the Barents Sea shelf.

Keywords: Ocean eddies, marginal ice zone, tidal currents, polynya formation, ocean remote sensing, synthetic aperture radar, optical scanners, Hopen Island, Barents Sea, Arctic Ocean.

Citation: Atadzhanova O. A., Kozlov I. E., Zimin A. V., Konik A. A., and Medvedeva A. V. (2025), Generation and Evolution of Eddies Under the Influence of the Tide Behind the Capes of Hopen Island in the Barents Sea, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES6018, <https://doi.org/10.2205/2025ES001029>, EDN: AFFCRU

Received: January 10, 2025

Accepted: June 19, 2025

Published: December 30, 2025



© 2025. The Authors.

References

- Atadzhanova O. A., Kozlov I. E. and Konik A. A. Eddies over Spitsbergen bank in the Barents Sea from year-round Sentinel-1 SAR Observations // Preprint. — 2024. — <https://doi.org/10.20944/preprints202405.0235.v1>.
- Atadzhanova O. A. and Zimin A. V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // Fundamental and Applied Hydrophysics. — 2019. — Vol. 12, no. 3. — P. 36–45. — <https://doi.org/10.7868/S2073667319030055>.
- Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., et al. Satellite Radar Observations of Small Eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. — 2017. — No. 2. — P. 75–83. — <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-75-83>.
- Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Svergun E. I., et al. Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea // Physical Oceanography. — 2018. — Vol. 25, no. 3. — <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-3-220-228>.
- Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., et al. 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, no. 7. — <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>.
- Dumanskaya O. I. Regularities and features of ice conditions of the Barents Sea in the second half of XX – early XXI century // The Barents Sea system. — Moscow : GEOS, 2021. — P. 179–194. — [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(15\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(15)). — (In Russian).

- Gade M., Byfield V., Ermakov S., et al. Slicks as Indicators for Marine Processes // *Oceanography*. — 2013. — Vol. 26, no. 2. — P. 138–149. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.39>.
- Ginzburg A. I. Nonstationary eddy motions in the ocean // *Oceanology*. — 1992. — Vol. 32, no. 6. — P. 997–1004. — (In Russian).
- Howard S. L. and Padman L. Arc2kmTM: Arctic 2 kilometer Tide Model, 2021. — 2021. — <https://doi.org/10.18739/A22N4ZK5G>.
- Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., et al. Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6754–6772. — <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06754>.
- Johannessen J. A., Shuchman R. A., Digranes G., et al. Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1996. — Vol. 101, no. C3. — P. 6651–6667. — <https://doi.org/10.1029/95JC02962>.
- Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. M. and Monin A. S. Synoptic vortices in the ocean. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1987. — 511 p. — (In Russian).
- Karimova S. S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. — 2012. — Vol. 50, no. 8. — P. 1107–1124. — <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., et al. Remote Sensing of Submesoscale eddies in Russian Seas // *Proceedings of the International Symposium “Mesoscale and Submesoscale Processes in the Hydrosphere and Atmosphere” (MSP-2018)*, 30 October – 02 November 2018. — Moscow : Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 2018. — P. 184–187. — <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-4-1-2018-52>. — (In Russian).
- Kowalik Z. and Marchenko A. Tidal Motion Enhancement on Spitsbergen Bank, Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2023. — Vol. 128, no. 1. — <https://doi.org/10.1029/2022JC018539>.
- Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., et al. Eddies in the Western Arctic Ocean From Spaceborne SAR Observations Over Open Ocean and Marginal Ice Zones // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2019. — Vol. 124, no. 9. — P. 6601–6616. — <https://doi.org/10.1029/2019JC015113>.
- Kozlov I. E. and 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, no. 1. — <https://doi.org/10.3390/rs14010134>.
- Kozlov I. E., Plotnikov E. V. and Manucharyan G. E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // *The Cryosphere*. — 2020. — Vol. 14, no. 9. — P. 2941–2947. — <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.
- Marchenko A. and Kowalik Z. Tidal Wave-Elliptic Island Interaction above the Critical Latitude // *Journal of Physical Oceanography*. — 2023. — Vol. 53, no. 3. — P. 683–698. — <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0018.1>.
- Munk W., Armi L., Fischer K., et al. Spirals on the sea // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 2000. — Vol. 456, no. 1997. — P. 1217–1280. — <https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0560>.
- Payandeh A. R., Washburn L., Emery B., et al. The Occurrence, Variability, and Potential Drivers of Submesoscale Eddies in the Southern California Bight Based on a Decade of High-Frequency Radar Observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2023. — Vol. 128, no. 10. — <https://doi.org/10.1029/2023JC019914>.
- Thomas L. N., Tandon A. and Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime*. — 2008. — P. 17–38. — <https://doi.org/10.1029/177GM04>.
- Zimin A. V. Subtidal processes and phenomena in the White Sea. — Moscow : GEOS, 2018. — 220 p. — (In Russian).