




ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ В УСЛОВИЯХ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯРНОГО ФРОНТА

Л. А. Петренко^{*,1} , И. Е. Козлов¹ , А. А. Коник² 

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия

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

* **Контакт:** Лариса Алексеевна Петренко, larcpetr@gmail.com

Проведено исследование вихреобразования в северной части Баренцева моря по данным спутниковой радиолокации в условиях полного отсутствия льда и ослабленного Полярного температурного фронта в июле 2022 г. На основе анализа 89 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) было выявлено 598 вихревых образований на свободной ото льда воде. 432 вихря имели циклонический тип вращения (72%), 166 – антициклонический (28%). Проанализировано влияние Полярного температурного фронта, ветровых условий, приливно-отливных течений и изменчивости рельефа дна на генерацию вихрей. Получено, что основной причиной вихреобразования в Баренцевом море является неустойчивость течений, возникающая в результате их взаимодействия с особенностями рельефа дна.

Ключевые слова: Баренцево море, вихреобразование, Полярный фронт, ветер, приливно-отливные течения, рельеф дна.

Цитирование: Петренко Л. А., Козлов И. Е., Коник А. А. Особенности вихреобразования в Баренцевом море в условиях ослабления Полярного фронта // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES5010. — DOI: 10.2205/2025es001008 — EDN: MNFQXV

Введение

Баренцево море является одним из окраинных морей континентального шельфа Северного Ледовитого океана со сложным рельефом дна, состоящим из различных плато, возвышенностей, желобов [Матвишов, 1977; Писарев, 2021].

Гидрологический режим моря в значительной степени определяется взаимодействием вод атлантического и арктического происхождения, которое обуславливает и наличие нескольких фронтальных зон: – прикромочного фронта у кромки поля дрейфующих льдов; – основного Полярного фронта в центральной части моря, разделяющего поступающие с запада атлантические воды от баренцевоморских; – стокового фронта, образующегося на границе распространения речных вод в южной части моря. В период полного отсутствия льда на северной границе моря выделяют также Арктический фронт в месте соприкосновения арктических и баренцевоморских вод [Ожигин и др., 2016; Loeng, 1991; Parsons et al., 1996].

В связи с продолжающейся тенденцией сокращения площади льдов в Арктическом бассейне [Иванов и др., 2013; Юлин и др., 2019; Feltham et al., 2015] участились случаи полного очищения Баренцева моря ото льда в летние месяцы и смещения границы распространения льдов севернее 80° с.ш. [Петренко и Козлов, 2023], в том числе и в связи с ростом повторяемости ветров южных румбов [Обзор..., 2023; Неукатр et al., 2023]. Также с начала текущего столетия выявлено уменьшение протяжённости фронтальных зон Баренцева моря и ослабление температурных градиентов в них [Ившин и др., 2020; Ivshin et al., 2019; Konik and Atadzhanova, 2024].

Ранее неоднократно рассматривался процесс вихреобразования в Баренцевом море [Atadzhanova et al., 2024; Atadzhanova and Zimin, 2019; Atadzhanova et al., 2017], а также

<https://elibrary.ru/MNFQXV>

Получено: 16 октября 2024 г.

Принято: 20 марта 2025 г.

Опубликовано: 7 октября 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

вопрос связи вихреобразования с динамикой фронтальных разделов [Коник и др., 2020; Костяной и др., 1992]. Анализ связи пространственного распределения выявленных вихрей с границами районов пространственной изменчивости температурных фронтальных зон в летний период в условиях различной ледовитости моря показал, что на фронтальные зоны приходится небольшой процент вихрей (13–26%).

Сочетание в июле 2022 г. таких условий как полное отсутствие льдов на акватории моря, летний прогрев вод и ослабление Полярного фронта даёт возможность выявить преобладающий механизм генерации вихрей в Баренцевом море. С этой целью для анализа была выбрана северная часть моря, обладающая наибольшей изменчивостью рельефа дна и системой квазипостоянных течений, переносящих воды как атлантического, так и арктического происхождения и включающая зону основного Полярного фронта. Южная часть моря (к югу от 74° с. ш.) не рассматривалась в основном в связи с отличием влияющих на динамику вод факторов, таких, например, как наличие речного стока и более выглаженный рельеф дна [Матвишов, 1977; Писарев, 2021].

Данные и методы

Для анализа активности вихреобразования в северной части Баренцева моря (74° с. ш. – 80,5° с. ш.; 16° в. д. – 60° в. д.) использовались радиолокационные изображения (РЛИ) спутника Sentinel-1 A/B за июль 2022 г. из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>). Этот месяц был выбран исходя из наибольшей встречаемости поверхностных проявлений вихревых структур в Баренцевом море по данным предыдущих исследований [Atadzhanova et al., 2017, 2018].

В ходе анализа спутниковых РЛИ выделялись поверхностные проявления вихревых структур, координаты центра вихрей, их диаметр, направление вращения, тип проявления и глубина места, соответствующая центру вихря. Анализ спутниковых РЛИ и выделение вихревых структур проводились в среде Matlab по методике, приведённой в работах [Kozlov et al., 2019; Petrenko and Kozlov, 2023].

Для расчёта горизонтальных градиентов температуры и солёности по методике, изложенной в [Ожигин и др., 2016] и применённой в [Konik and Atadzhanova, 2024], использовались среднесеasonные значения поверхностной температуры реанализа GLORYS12v1 с разрешением 0,083°. Данные о скорости и направлении среднесуточного ветра взяты из реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>).

Расчет приливных течений производился по модели Arc2kmTM [Howard and Padman, 2021].

Результаты и обсуждение

Покрытие района исследований спутниковой съёмкой радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА-съёмкой) приведено на рис. 1. Как видно, наиболее информативно была представлена северная часть района исследований (до 30 снимков). В среднем покрытие снимками составило 17 РЛИ на ячейку сетки размером 16 ячеек × 42 ячейки.

На основе анализа 89 спутниковых РЛИ было выявлено 598 вихревых образований на свободной ото льда воде. 432 вихря имели циклонический тип вращения (72%), 166 – антициклонический (28%). Их пространственное распределение приведено на рис. 2, на котором синим цветом обозначены циклонические вихри, а красным – антициклонические, размер маркера пропорционален реальному диаметру вихрей (маркер диаметром 1 мм на рисунке соответствует диаметру вихря 30 км).

Из рисунка видно, что в рассматриваемый период выявленные вихревые образования в основном приурочены к зонам поднятий дна: у о. Медвежий и Шпицбергенской банке с о. Надежды на западе, возвышенности Персея в центральной части моря, к областям прибрежного шельфа островов Белый и Виктория на севере, а также в районе малых глубин к югу от арх. Земля Франца-Иосифа. Исключение составляет обширная банка у арх. Новая Земля, где поверхностные проявления вихревых структур практически не наблюдались. Одной из причин подобного распределения вихревых образований

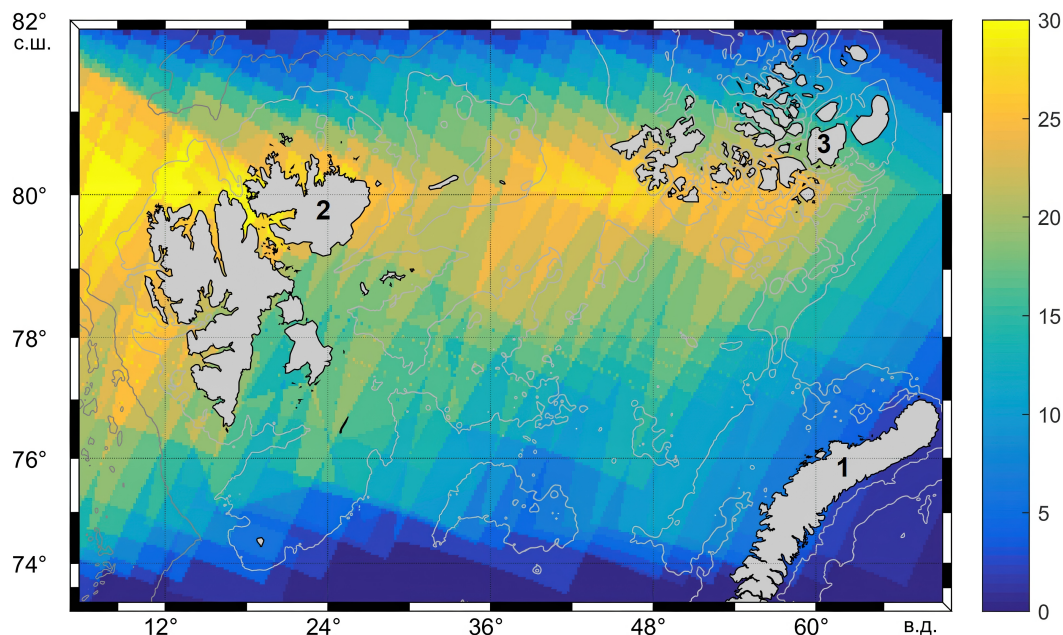


Рис. 1. Покрытие района исследований спутниковой РСА-съёмкой в июле 2022 г. 1 – арх. Новая Земля, 2 – арх. Шпицберген, 3 – арх. Земля Франца-Иосифа.

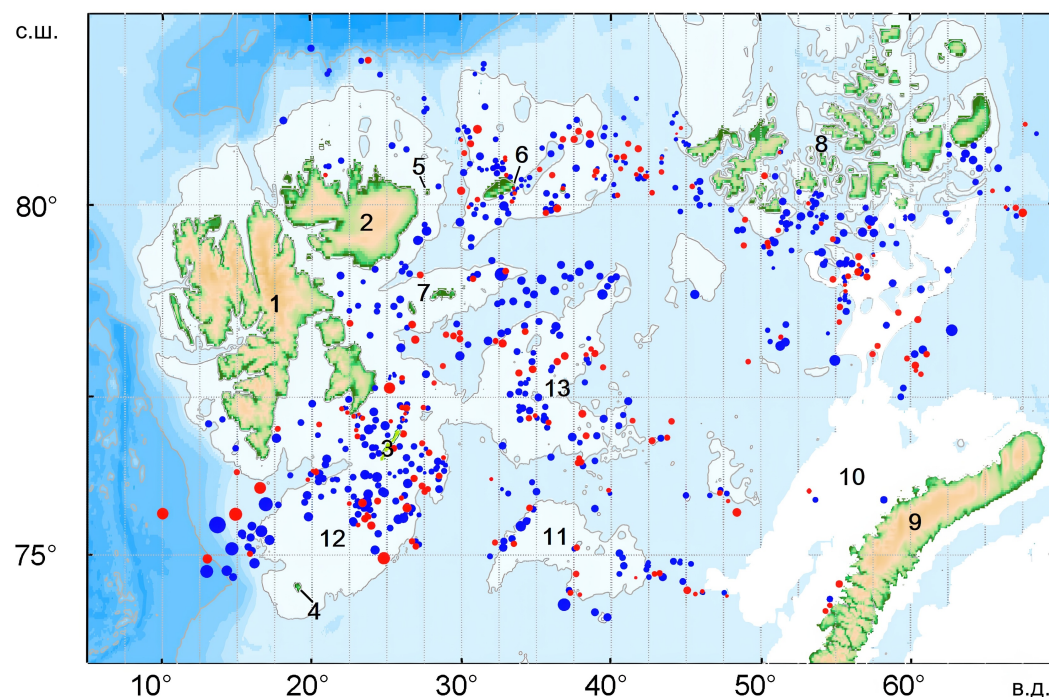


Рис. 2. Пространственное распределение вихревых структур: циклонические – синий, антициклонические – красный. 1 – о. Западный Шпицберген, 2 – о. Северо-Восточная Земля, 3 – о. Надежды, 4 – о. Медвежий, 5 – о. Стурейя, 6 – о. Белый, 7 – арх. Земля Короля Карла, 8 – арх. Земля Франца-Иосифа, 9 – о. Северный арх. Новая Земля, 10 – Новоземельская банка, 11 – Центральная банка, 12 – Шпицбергенская возвышенность, 13 – возвышенность Персея.

являются преобладающие в июле 2022 г. над акваторией Баренцева моря сильные ветры южных и западных румбов со скоростью свыше 15 м/с (рис. 3). Юго-западные ветры приводят к увеличению притока тёплых атлантических вод в регион, а юго-восточные – к интенсификации выноса баренцевоморских и трансформированных атлантических вод в арктический бассейн [Adlandsvik, 1989; Adlandsvik and Loeng, 1991; Johannessen

and Foster, 1978]. В проливе между арх. Земля Франца-Иосифа и арх. Новая Земля наблюдался широтный перенос: наиболее частые сильные западные ветра сменялись ненадолго восточными.

Из-за действия сильных ветров поверхностные проявления вихревых структур могли быть зафиксированы в зонах ослабления ветра и зонах ветровой тени. Наблюдаемое у наветренного западного побережья арх. Новая Земля интенсивное ветровое волнение препятствовало проявлению вихревых образований.

На рис. 4 приведены примеры спутниковых РЛИ с поверхностным проявлением вихревых структур при различных силе и направлении ветра.

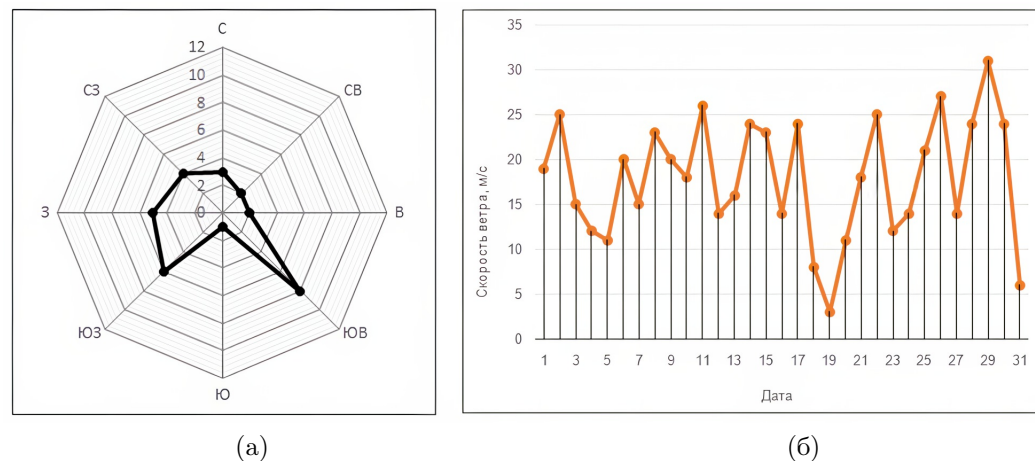


Рис. 3. Изменчивость направления (а) и скорости ветра (б) в июле 2022 г. в центре Баренцева моря (77° с. ш., 43° в. д.).

На рис. 4б сверху изображён увеличенный фрагмент радиолокационного снимка за 17.07.2022 при действии в выделенном районе у арх. Земля Франца-Иосифа слабого юго-западного ветра со скоростью до 7 м/с. На снимке вихреобразование стало заметным в результате плёчно-сликового проявления в зонах конвергенции поверхностных вод (светлые полосы на снимке). Второй фрагмент отображает картину поверхностного проявления вихреобразования 29.07.2022 при более сильном северо-западном ветре со скоростью 7–10 м/с (рис. 4б, внизу). Светлые однородные области в верхней части фрагмента демонстрируют зашумляющее действие ветра. Ниже, на границе с зоной ветровой тени (тёмная область), хорошо различимы многочисленные вихревые структуры как сликового, так и ветро-волнового проявления. Видны и отдельные вихри, и структуры в виде диполей и сочетания нескольких вихревых образований различного типа вращения. Слева отчётливо виден крупный циклонический вихрь смешанного сликово-ветро-волнового проявления с несколькими малыми вихрями на его периферии.

Случай генерации и проявления вихревых структур в зоне ветровой тени в условиях действия сильного ветра при обтекании последним о. Северо-Восточная Земля иллюстрирует рис. 5. Как видно на приведённом фрагменте РЛИ за 27.07.2022 за о. Северо-Восточная Земля при сильном северном ветре образовалась зона ветровой тени, в которой оказался небольшой о. Шведский (указан на рисунке жёлтой стрелкой). На рис. 5б видно, что у острова образовалось несколько достаточно крупных антициклонических и циклонических вихрей из-за горизонтального сдвига скорости в поле дрейфовых течений, вызванных неоднородным распределением скорости ветра.

Для выявления районов постоянной генерации вихревых структур была рассчитана повторяемость вихрей по акватории моря. Повторяемость определялась как отношение количества наблюдаемых вихрей в конкретной ячейке сетки размером 16 ячеек \times 42 ячейки в пределах координат района за рассматриваемый период к количеству спутниковых изображений, приходящихся на данную ячейку. Распределение повторяемости вихрей по акватории Баренцева моря представлено на рис. 6.

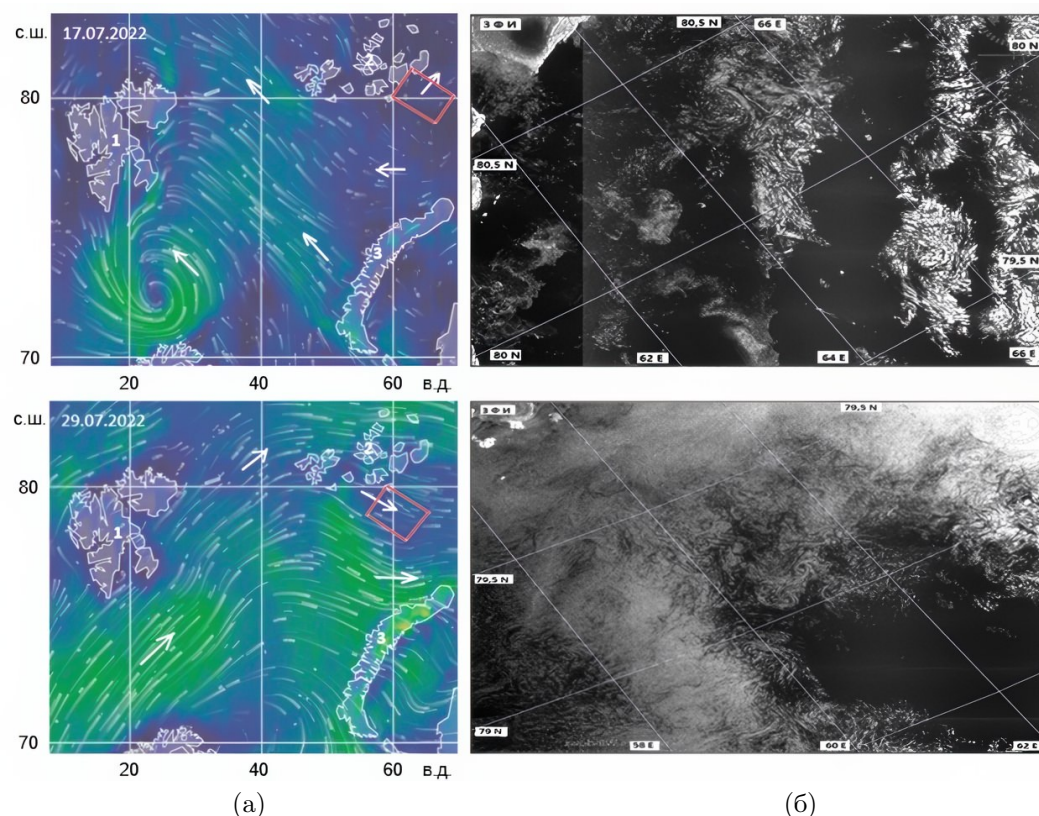


Рис. 4. Поверхностное проявление вихревых структур у арх. Земля Франца-Иосифа (районы выделены красным) при различном атмосферном форсинге: пространственное распределение скорости и направления ветра (белые стрелки) над акваторией Баренцева моря (а); увеличенные фрагменты РЛИ *Sentinel 1* за 17.07.2022 и 29.07.2022, соответственно (б).

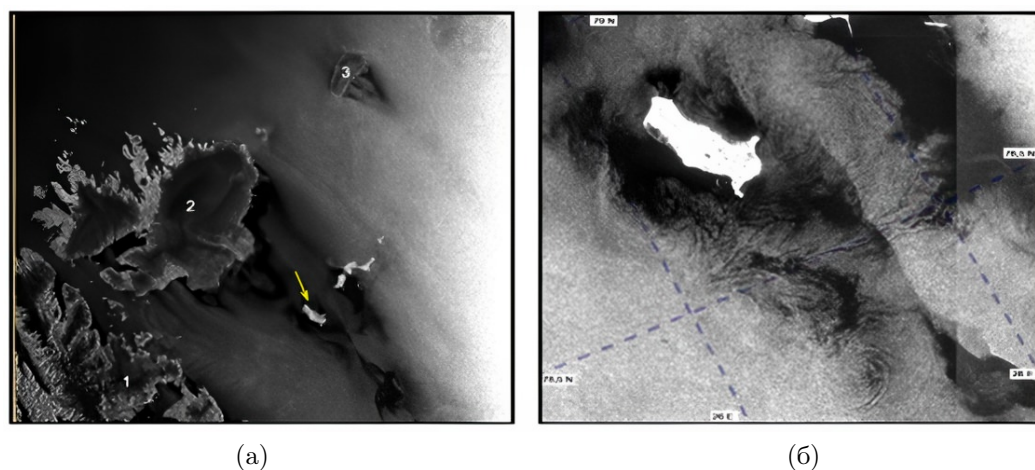


Рис. 5. Поверхностные проявления вихревых структур у о. Шведский (указан стрелкой) в зоне ветровой тени 22.07.2022: фрагмент РЛИ *Sentinel-1* за 22.07.2022 (а), увеличенный фрагмент РЛИ в районе о. Шведский (б).

Наибольшая повторяемость вихревых структур (т.е. проявление на 45–50% РЛИ, попадающих в квадрат сетки) наблюдалась в районе о. Надежды к югу от арх. Шпицберген и приурочена к границе Медвежьинского течения; у Центральной возвышенности, что, вероятно, связано с положением Полярной фронтальной зоны; у о. Белый на севере моря, в районе малых островов к югу от арх. Земля Франца-Иосифа и в проливе между

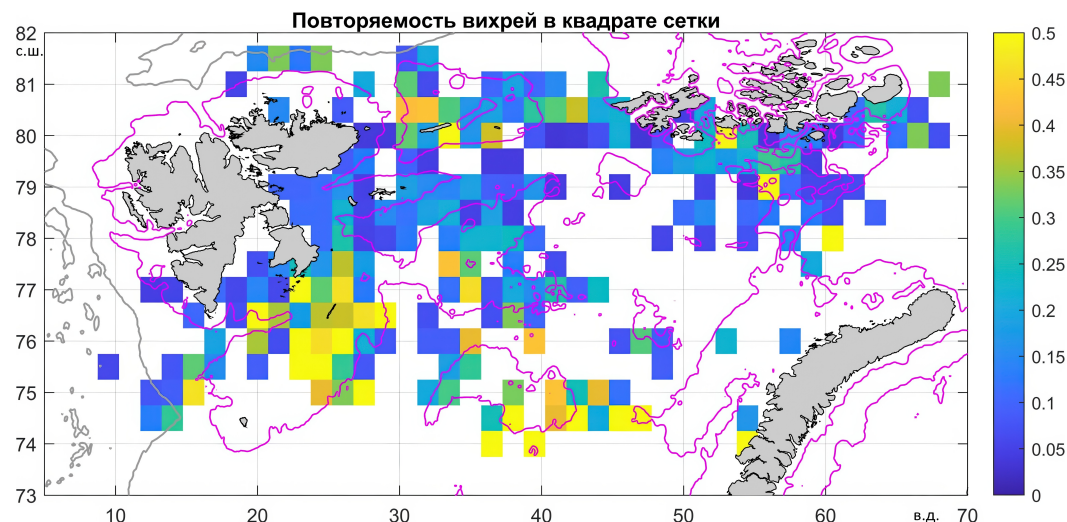


Рис. 6. Повторяемость вихревых структур на акватории Баренцева моря в июле 2022 г. Сиреневым выделена изобата 200 м.

арх. Земля Франца-Иосифа и арх. Новая Земля из-за особенностей морфометрии дна и системы течений.

По гистограмме распределения количества наблюдаемых вихрей по диаметрам (рис. 7а) видно, что большинство идентифицированных вихрей имело диаметры до 10 км. Менее 5% приходится на вихри с диаметрами более 20 км. Максимальная выявленная величина диаметра составила 40 км. При этом более 70% вихрей были зафиксированы в местах с глубинами до 200 м (рис. 7б), что указывает на влияние особенностей рельефа дна на вихреобразование.

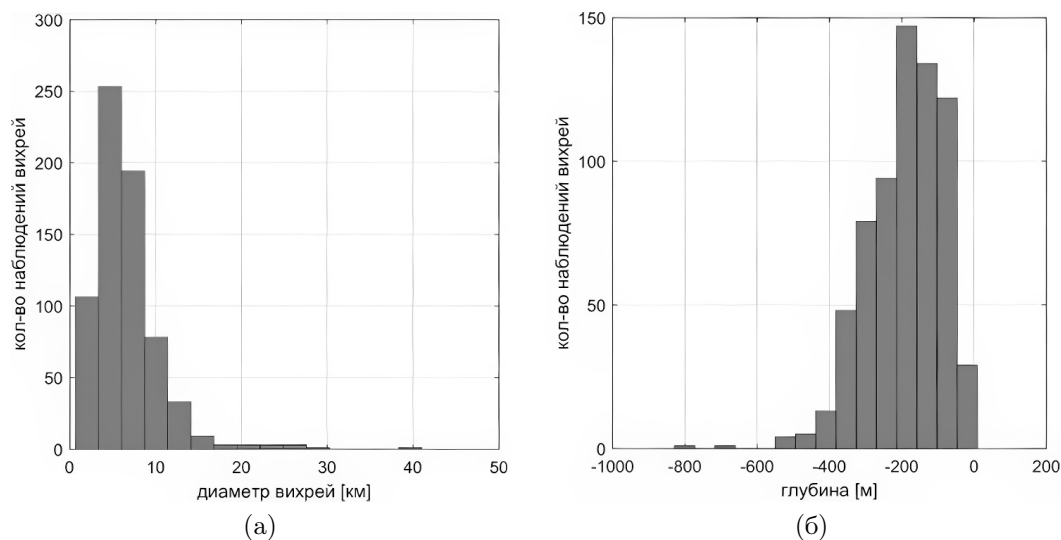


Рис. 7. Гистограммы распределения количества наблюдаемых вихрей по диаметрам вихревых структур (а) и в зависимости от глубины места выявления (б).

Вихри с наибольшими величинами диаметров в июле 2022 г. локализовались преимущественно в западной и северо-западной частях Баренцева моря (рис. 8). Пространственное распределение максимальных значений диаметра вихревых структур, рассчитанные для каждой ячейки сетки, показывает, что вихри больших диаметров фиксировались как в районах малых глубин с особенностями рельефа дна, так и над глубокой водой. Крупные вихри были выявлены в районе Медвежинской банки и Шпицбергенского шельфа у о. Надежды, на особенностях рельефа дна Центральной банки, возвышенности Персея и над впадиной, отделяющей возвышенность Персея от шель-

фовой зоны островов Земли Короля Карла. Крупные вихри регистрировались также в местах резкого перепада глубин, например, к югу от арх. Земля Франца-Иосифа, что указывает на влияние сложной морфометрии дна на вихреобразование.

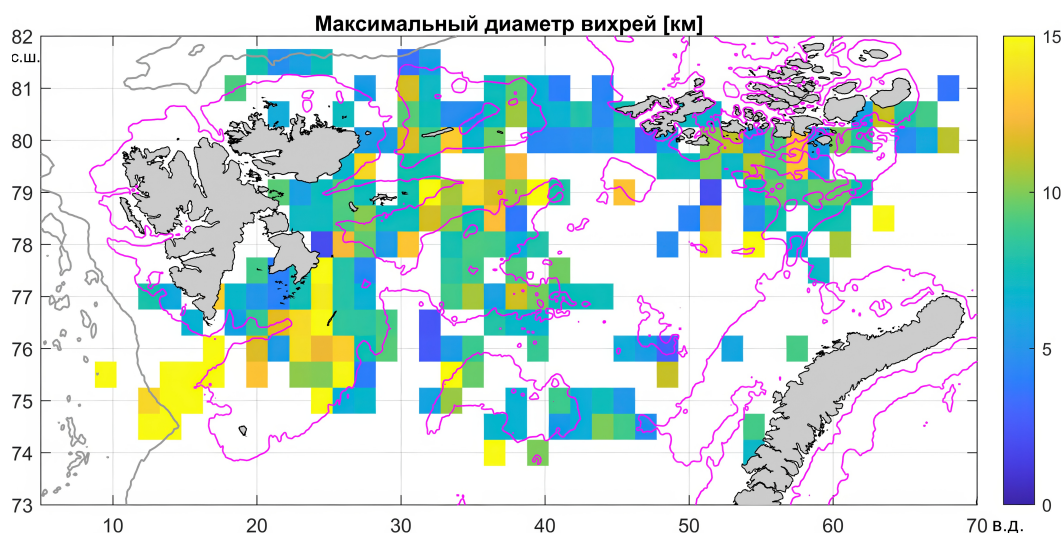


Рис. 8. Пространственное распределение максимальных диаметров вихревых структур на акватории Баренцева моря в июле 2022 г. Сиреневым выделена изобата 200 м.

По данным реанализа GLORYS12v1 о среднемесячных значениях поверхностной температуры были рассчитаны горизонтальные градиенты (рис. 9). В июле 2022 г. повышенные значения градиентов температуры у 80° с. ш. между арх. Шпицберген и арх. Земля Франца-Иосифа были обусловлены Арктическим фронтом, отделяющим баренцевоморские воды от полярных. Наиболее обострённые значения градиентов, определяющие положение Полярного температурного фронта, чётко прослеживались на западе Баренцева моря не далее 35° в. д. и ослабевали по направлению к востоку. В среднем Полярный фронт отслеживался в пределах 75°–76° с. ш. Максимумы горизонтальных градиентов температуры наблюдались в районе склонов Шпицбергенской банки, к югу от возвышенности Персея и на южной окраине Центральной банки. Высокие значения градиентов также отмечены на севере моря у о. Белый и у о. Северо-Восточная Земля, а также на южной окраине арх. Земля Франца-Иосифа.

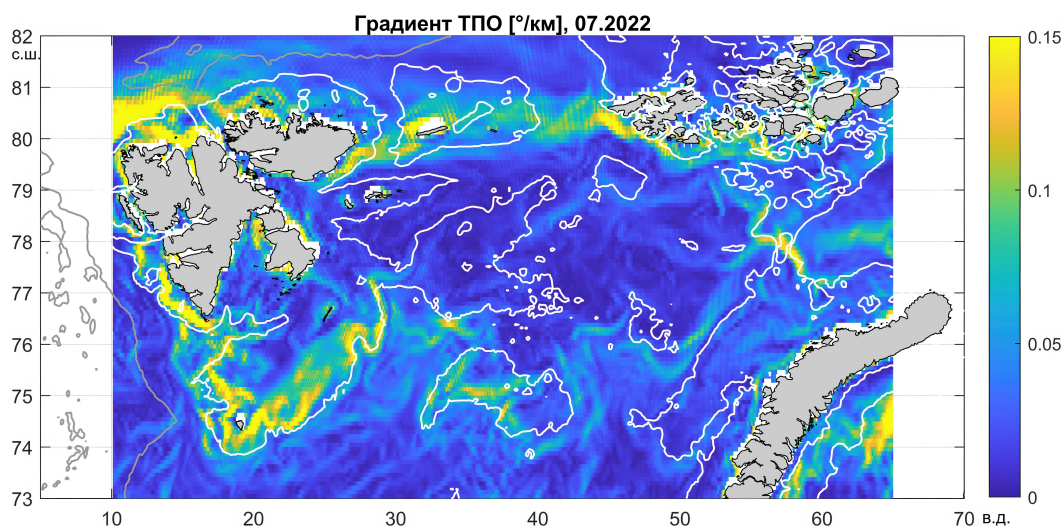


Рис. 9. Распределение горизонтальных градиентов среднемесячной температуры поверхности Баренцева моря в июле 2022 г.

Южнее между арх. Земля Франца-Иосифа и арх. Новая Земля максимум выявлен в районе 58° в. д. в районе со сложным рельефом дна. Практически на всем протяжении в рассматриваемый период Полярный фронт был в основном топографически обусловлен и приурочен к изобате 200 м, что согласуется с результатом работы [Morozov et al., 2017]. У Медвежинско-Шпицбергенской банки [Barton et al., 2018] соотносит температурный фронтальный раздел с изобатой 220 м, другие исследователи – с изобатой 250 м [Harris, 1996; Harris et al., 1998]. Согласно исследованиям [Ingvaldsen, 2005], положение фронта в этом районе имеет сезонную изменчивость. При сильных ветрах в тёплый период фронт располагается выше по склону дна по сравнению с холодным периодом, что также видно на рис. 9 – фронтальный раздел находится несколько выше изобаты 200 м.

Как и в работе [Morozov et al., 2017], нами выявлена зона размытия Полярного фронта на восточном пологом склоне Медвежинско-Шпицбергенской банки между 25° в. д. - 27° в. д. как результат воздействия приливно-отливных движений. Наиболее обострённые температурные градиенты наблюдаются у более крутых склонов.

Тем не менее, для большей части северной половины Баренцева моря были характерны минимальные значения температурных градиентов, указывающие на то, что в июле 2022 г. поверхностные воды являлись в достаточной степени однородными, чему способствовали и ветровые условия.

Сравнение пространственного расположения зон повышенных градиентов температуры поверхности воды с местами идентификации вихревых структур показало, что районы наиболее частого проявления вихрей не совпадают с положением Полярного фронта, как было показано и в [Коник и др., 2020]. В пределах фронтальных зон в июле 2022 г. было выявлено 84 вихря, что составило 14% от общего количества выявленных в указанный период вихрей на акватории моря. Вне фронтальных зон в Баренцевом море поверхностные проявления вихрей были приурочены большей частью к особенностям рельефа дна.

Результаты расчетов приливных течений по модели Arc2kmTM продемонстрировали увеличение модуля скорости над глубинами менее 100 м (рис. 10). Наибольшая интенсификация приливных течений наблюдалась над Медвежинско-Шпицбергенской возвышенностью с глубинами до 100 м, отдельным поднятием дна (79° с. ш., 48° в. д. с минимальной глубиной 72 м), на шельфе у о. Северо-Восточная Земля и о. Белый. Эффект топографического усиления приливного течения ранее был исследован на основе математического моделирования [Kowalik and Proshutinsky, 1995; Robinson, 1981; Zimmerman, 1978], в результате которого также был сделан вывод, что взаимодействие приливно-отливных течений с поднятиями дна способствует переносу завихренности из осциллирующего поля приливных скоростей в среднее (остаточное) поле. Повышенная частота проявлений вихревых структур в июле 2022 г. в районах топографического усиления подтверждает сделанные выводы.

Сопоставление пространственного распределения выявленных вихревых структур в северной части Баренцева моря в июле 2022 г. с распределением в августе 2007 г. и августе 2009 г., приведённых в [Коник и др., 2020], демонстрирует несовпадение картины поверхностного проявления вихрей (рис. 11). На рисунке красным пунктиром выделены зоны очевидного несовпадения областей проявления вихревых структур в июле 2022 г. с другими приведёнными периодами.

Сравнение ветровых условий в указанные периоды позволяет сделать вывод о зависимости мест вихреобразования от направления преобладающих ветров, и, следовательно, от иницируемых ими дрейфовых течений. Так в августе 2007 г. (рис. 11а) над акваторией преобладали ветры северо-западных румбов, сменявшиеся юго-восточными ветрами со скоростями до 15 м/сек. При этом районы моря к востоку и к югу от арх. Шпицберген находились в области ветровой тени с минимальными скоростями ветра, что, по-видимому, объясняет отсутствие здесь вихревых структур в этот период. В августе 2009 г. преобладающими были слабые и умеренные ветры северных направлений (рис. 11б), а на акватории моря практически до 79° с. ш. сохранялся ледовый

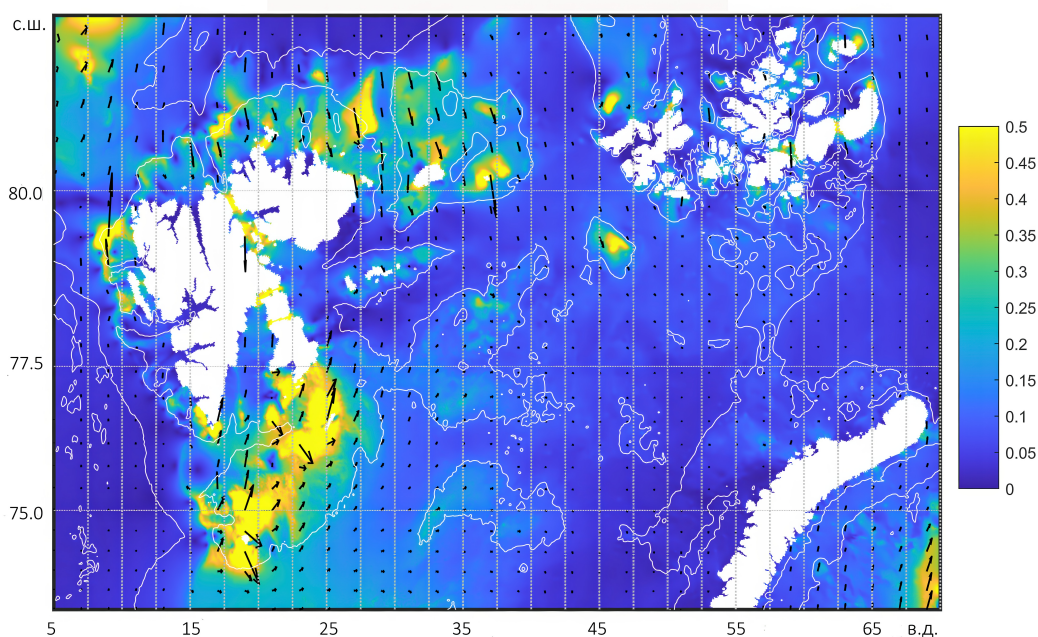


Рис. 10. Пространственное распределение скорости и направления приливных течений в Баренцевом море 17 июля 2022 г., 03:55 UTC.

покров. Очевидно, что талые воды, увлекаемые ветром с севера (северо-востока) на юг (юго-запад) способствовали более интенсивному вихреобразованию в западной части Баренцева моря.

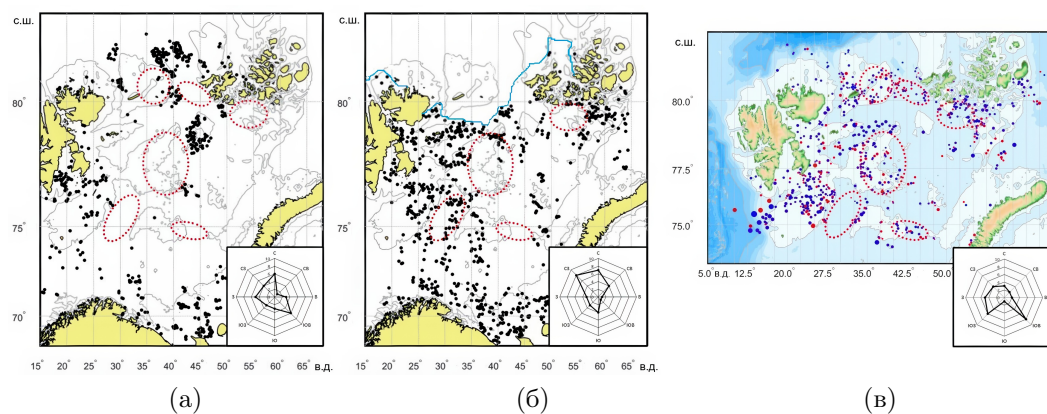


Рис. 11. Пространственное распределение вихревых структур и розы ветров в августе 2007 г. (а), в августе 2009 г. (б) [Коник и др., 2020] и в июле 2022 г. (в). Голубой линией обозначено положение границы распространения льдов, красным пунктиром – отличающие зоны генерации вихрей в июле 2022 г.

К началу июля 2022 г. кромка льдов уже сместилась к 82° с.ш. от северной границы Баренцева моря. В этот период действовали сильные ветры юго-восточного и юго-западного направлений (рис. 3), что обусловило вихреобразование в районах с выраженными неоднородностями рельефа дна (рис. 11в). Несмотря на схожесть распространения вихрей по морю с августом 2009 г., видно более восточное положение зоны генерации вихрей на возвышенности Персея, большее количество вихрей в окрестности о. Надежды, у северной границы моря и с юго-западной стороны арх. Земля Франца-Иосифа, а также практически полное отсутствие вихрей между Шпицбергенской банкой и Центральным плато.

Отличающийся ветровой форсинг привёл к различным картинам распределения вихрей, что подтверждает важность вклада региональных ветров в динамику вод Баренцева моря и, как следствие, в интенсивность вихреобразования.

Заключение

Проведены исследования причин вихреобразования в северной части Баренцева моря в июле 2022 г. по данным спутниковых РЛИ Sentinel – 1 А/В при полном отсутствии льда на акватории и в условиях ослабленного Полярного температурного фронта.

В ходе обработки 89 спутниковых РЛИ было выявлено 598 вихревых структур на свободной ото льда акватории моря, из которых 72% вихрей имели циклоническое направление вращения, а 28% – антициклоническое. В пределах фронтальной зоны идентифицировано 14% вихревых структур.

Большинство идентифицированных вихрей имело диаметры до 10 км. Максимальная зафиксированная величина диаметра составила 40 км. Вихри больших диаметров наблюдались как на глубокой воде, так и в районах малых глубин.

Ключевыми районами генерации вихревых образований в июле 2022 г. в Баренцевом море являлись зоны мелководных поднятий дна: Шпицбергенская банка на западе, возвышенность Персея в центральной части моря, районы прибрежного шельфа о. Северо-Восточная Земля и о. Белый на севере, а также район с малыми глубинами и сложным донным рельефом к югу от арх. Земля Франца-Иосифа.

Места поверхностных проявлений вихревых структур не совпадают с положением температурного фронта. Региональные ветры оказывают влияние на процесс генерации вихревых структур. Приливно-отливные течения, взаимодействуя с неоднородным рельефом дна, также способствуют вихреобразованию.

Основной причиной генерации вихревых структур в Баренцевом море в отсутствие льда и в условиях ослабленного Полярного температурного фронта является неустойчивость течений, возникающая как под действием преобладающих ветров, так и в результате взаимодействия их с особенностями рельефа дна.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института Российской академии наук (МГИ РАН) по теме № FNNN-2024-0017, анализ фронтальных зон проведён по теме государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) № FMWF-2024-0028.

Список литературы

- Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А. и др. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. — 2013. — № 4. — С. 50–65. — <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>.
- Ившин В. А., Трофимов А. Г. и Титов О. В. Изменчивость термических фронтальных зон Баренцева моря за период 1960-2018 гг. // Труды ВНИРО. — 2020. — Т. 180. — С. 60–71. — <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-180-60-71>.
- Коник А. А., Козлов И. Е., Зимин А. В. и др. Спутниковые наблюдения вихрей и фронтальных зон Баренцева моря в годы с различной ледовитостью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2020. — Т. 17, № 5. — С. 191–201. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201>.
- Костяной А. Г., Лебедев И. А., Новиков В. Б. и др. О вихреобразовании в Полярной фронтальной зоне Баренцева моря // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. — 1992. — Т. 426. — С. 19–32.
- Матишов Г. Г. Рельеф, морфотектоника и основные черты развития шельфа Баренцева моря // Океанология. — 1977. — Т. 17, № 3. — С. 490–496. — EDN: [XCRPLV](#).
- Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. 2022 / под ред. А. С. Макарова. — СПб. : ААНИИ, 2023. — С. 79.
- Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. — Мурманск : ПИНРО, 2016. — 216 с.

- Петренко Л. А. и Козлов И. Е. Мезомасштабные и субмезомасштабные особенности динамики вод вблизи архипелага Шпицберген // Материалы XXI Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 13–17 ноября 2023 г.) — М. : ИКИ РАН, 2023. — С. 239. — <https://doi.org/10.21046/21DZZconf-2023a>.
- Писарев С. В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря. — М. : ГЕОС, 2021. — С. 153–166. — [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(13\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(13)).
- Юлин А. В., Вязигина Н. А. и Егорова Е. С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // Российская Арктика. — 2019. — № 7. — С. 28–40. — <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>.
- Adlandsvik B. Wind-driven variations in the Atlantic inflow to the Barents Sea // ICES C.M./C. — 1989. — Vol. 18. — P. 1–13.
- Adlandsvik B. and Loeng H. A study of the climatic system in the Barents Sea // Polar Research. — 1991. — Vol. 10, no. 1. — P. 45–50. — <https://doi.org/10.3402/polar.v10i1.6726>.
- 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 // Preprints.org. — 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 // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. — 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. — P. 220–228. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2018-3-220-228>.
- Barton B. I., Lenn Y.-D. and Lique C. Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice // Journal of Physical Oceanography. — 2018. — Vol. 48, no. 8. — P. 1849–1866. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0003.1>.
- Feltham D., Tsamados M., Petty A., et al. Processes controlling surface, bottom and lateral melt of Arctic sea ice in a state of the art sea ice model // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2015. — Vol. 373, no. 2052. — P. 20140167. — <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0167>.
- Harris C. L. Water mass distribution and Polar Front structure in the Southwestern Barents Sea. — Massachusetts Institute of Technology, Woods Hole Oceanographic Institution, 1996. — P. 106. — <https://doi.org/10.1575/1912/5724>.
- Harris C. L., Plueddemann A. J. and Gawarkiewicz G. G. Water mass distribution and polar front structure in the western Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1998. — Vol. 103, no. C2. — P. 2905–2917. — <https://doi.org/10.1029/97jc02790>.
- Heukamp F. O., Aue L., Wang Q., et al. Cyclones modulate the control of the North Atlantic Oscillation on transports into the Barents Sea // Communications Earth & Environment. — 2023. — Vol. 4, no. 1. — P. 1–11. — <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00985-1>.
- Howard L. S. and Padman L. Arc2kmTM: Arctic 2 kilometer Tide Model, 2021. — 2021. — <https://doi.org/10.18739/A2PV6B79W>.
- Ingvaldsen R. B. Width of the North Cape Current and location of the Polar Front in the western Barents Sea // Geophysical Research Letters. — 2005. — Vol. 32, no. 16. — P. L16603. — <https://doi.org/10.1029/2005gl023440>.
- Ivshin V. A., Trofimov A. G. and Titov O. V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // ICES Journal of Marine Science. — 2019. — Vol. 76, Supplement_1. — P. i3–i9. — <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz159>.
- Johannessen O. M. and Foster L. A. A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1978. — Vol. 83, no. C9. — P. 4567–4571. — <https://doi.org/10.1029/jc083ic09p04567>.
- Konik A. A. and Atadzhanova O. A. Variability of Decadal Horizontal Thermohaline Gradients on the Surface of the Barents Sea during Summer Season in 1993–2022 // Physical Oceanography. — 2024. — Vol. 31, no. 1. — P. 46–58. — EDN: QMQSWW.
- Kowalik Z. and Proshutinsky A. Yu. Topographic enhancement of tidal motion in the western Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1995. — Vol. 100, no. C2. — P. 2613–2637. — <https://doi.org/10.1029/94jc02838>.

- 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>.
- Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea // *Polar Research*. — 1991. — Vol. 10, no. 1. — P. 5–18. — <https://doi.org/10.3402/polar.v10i1.6723>.
- Morozov A. N., Pavlov V. K., Pavlova O. A., et al. Polar Frontal Zone of the Barents Sea Western Trough Based on the Direct Measurements in 2007 // *Physical Oceanography*. — 2017. — No. 2. — P. 36–50. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2017-2-36-50>.
- Parsons A. R., Bourke R. H., Muench R. D., et al. The Barents Sea Polar Front in summer // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1996. — Vol. 101, no. C6. — P. 14201–14221. — <https://doi.org/10.1029/96jc00119>.
- Petrenko L. A. and Kozlov I. E. Variability of the Marginal Ice Zone and Eddy Generation in Fram Strait and near Svalbard in Summer Based on Satellite Radar Observations // *Physical Oceanography*. — 2023. — Vol. 30, no. 5. — P. 594–611. — EDN: QZZVDD.
- Robinson I. S. Tidal vorticity and residual circulation // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. — 1981. — Vol. 28, no. 3. — P. 195–212. — [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90062-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90062-5).
- Zimmerman J. T. F. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. — 1978. — Vol. 11, no. 1. — P. 35–47. — <https://doi.org/10.1080/03091927808242650>.

FEATURES OF EDDY GENERATION IN THE BARENTS SEA UNDER CONDITIONS OF THE POLAR FRONT WEAKENING

L. A. Petrenko^{*1} , I. E. Kozlov¹ , and A. A. Konik² 

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

****Correspondence to:** Larisa Petrenko, larcpetr@gmail.com

A study of eddy generation in the northern Barents Sea was conducted using satellite radar data in conditions of a complete absence of ice and a weakened Polar Temperature Front in July 2022. Based on the analysis of 89 satellite radar images, 598 eddy formations were identified in ice-free water. 432 eddies had a cyclonic rotation type (72%), 166 had an anticyclonic rotation type (28%). The influence of the Polar Temperature Front, wind conditions, tidal currents and bottom relief variability on eddy generation was analyzed. It was found that the main cause of eddy formation in the Barents Sea is the instability of currents resulting from their interaction with bottom relief features.

Keywords: Barents Sea, eddy generation, Polar Front, wind, tidal currents, bottom relief.

Citation: Petrenko L. A., Kozlov I. E., and Konik A. A. (2025), Features of Eddy Generation in the Barents Sea Under Conditions of the Polar Front Weakening, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES5010, <https://doi.org/10.2205/2025ES001008>, EDN: MNFQXV

Received: October 16, 2024

Accepted: March 20, 2025

Published: October 7, 2025



© 2025. The Authors.

References

- Adlandsvik B. Wind-driven variations in the Atlantic inflow to the Barents Sea // ICES C.M./C. — 1989. — Vol. 18. — P. 1–13.
- Adlandsvik B. and Loeng H. A study of the climatic system in the Barents Sea // Polar Research. — 1991. — Vol. 10, no. 1. — P. 45–50. — <https://doi.org/10.3402/polar.v10i1.6726>.
- 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 // Preprints.org. — 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 // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. — 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. — P. 220–228. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2018-3-220-228>.
- Barton B. I., Lenn Y.-D. and Lique C. Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice // Journal of Physical Oceanography. — 2018. — Vol. 48, no. 8. — P. 1849–1866. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0003.1>.
- Feltham D., Tsamados M., Petty A., et al. Processes controlling surface, bottom and lateral melt of Arctic sea ice in a state of the art sea ice model // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2015. — Vol. 373, no. 2052. — P. 20140167. — <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0167>.
- Harris C. L. Water mass distribution and Polar Front structure in the Southwestern Barents Sea. — Massachusetts Institute of Technology, Woods Hole Oceanographic Institution, 1996. — P. 106. — <https://doi.org/10.1575/1912/5724>.
- Harris C. L., Plueddemann A. J. and Gawarkiewicz G. G. Water mass distribution and polar front structure in the western Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1998. — Vol. 103, no. C2. — P. 2905–2917. — <https://doi.org/10.1029/97jc02790>.

- Heukamp F. O., Aue L., Wang Q., et al. Cyclones modulate the control of the North Atlantic Oscillation on transports into the Barents Sea // *Communications Earth & Environment*. — 2023. — Vol. 4, no. 1. — P. 1–11. — <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00985-1>.
- Howard L. S. and Padman L. Arc2kmTM: Arctic 2 kilometer Tide Model, 2021. — 2021. — <https://doi.org/10.18739/A2PV6B79W>.
- Ingvaldsen R. B. Width of the North Cape Current and location of the Polar Front in the western Barents Sea // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, no. 16. — P. L16603. — <https://doi.org/10.1029/2005gl023440>.
- Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., et al. Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal? // *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa*. — 2013. — No. 4. — P. 50–65. — <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>. — (In Russian).
- Ivshin V. A., Trofimov A. G. and Titov O. V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960-2017: variability, weakening, shifting // *ICES Journal of Marine Science*. — 2019. — Vol. 76, Supplement_1. — P. i3–i9. — <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz159>.
- Ivshin V. A., Trofimov A. G. and Titov O. V. Barents Sea thermal frontal zones variability in 1960-2018 // *Trudy VNIRO*. — 2020. — Vol. 180. — P. 60–71. — <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-180-60-71>. — (In Russian).
- Johannessen O. M. and Foster L. A. A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1978. — Vol. 83, no. C9. — P. 4567–4571. — <https://doi.org/10.1029/jc083ic09p04567>.
- Konik A. A. and Atadzhanova O. A. Variability of Decadal Horizontal Thermohaline Gradients on the Surface of the Barents Sea during Summer Season in 1993-2022 // *Physical Oceanography*. — 2024. — Vol. 31, no. 1. — P. 46–58. — EDN: [QMQSWW](https://www.edn.ru/qmqsww).
- Konik A. A., Kozlov I. E., Zimin A. V., et al. Satellite observations of eddies and frontal zones in the Barents Sea during years of different ice cover properties // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2020. — Vol. 17, no. 5. — P. 191–201. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201>. — (In Russian).
- Kostiainoi A. G., Lebedev I. A., Novikov V. B., et al. On Eddy Formation in the Polar Frontal Zone of the Barents Sea // *Trudy AARI*. — 1992. — Vol. 426. — P. 19–32. — (In Russian).
- Kowalik Z. and Proshutinsky A. Yu. Topographic enhancement of tidal motion in the western Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1995. — Vol. 100, no. C2. — P. 2613–2637. — <https://doi.org/10.1029/94jc02838>.
- 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>.
- Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea // *Polar Research*. — 1991. — Vol. 10, no. 1. — P. 5–18. — <https://doi.org/10.3402/polar.v10i1.6723>.
- Matishov G. G. Relief, Morphotectonics and Principal Features of the Barents Sea Shelf Development // *OKeanologiya*. — 1977. — Vol. 17, no. 3. — P. 490–496. — EDN: [XCRPLV](https://www.edn.ru/xcrplv); (in Russian).
- Morozov A. N., Pavlov V. K., Pavlova O. A., et al. Polar Frontal Zone of the Barents Sea Western Trough Based on the Direct Measurements in 2007 // *Physical Oceanography*. — 2017. — No. 2. — P. 36–50. — <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2017-2-36-50>.
- Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., et al. The Barents Sea Water: structure, circulation, variability. — Murmansk : PINRO, 2016. — 216 p. — (In Russian).
- Parsons A. R., Bourke R. H., Muench R. D., et al. The Barents Sea Polar Front in summer // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1996. — Vol. 101, no. C6. — P. 14201–14221. — <https://doi.org/10.1029/96jc00119>.
- Petrenko L. A. and Kozlov I. E. Mesoscale and Submesoscale Features of Water Dynamics near the Svalbard Archipelago // *Proceedings of the XXI International Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space" (Moscow, November 13-17, 2023)*. — M. : Space Research Institute of RAS, 2023a. — P. 239. — <https://doi.org/10.21046/21DZZconf-2023a>. — (In Russian).
- Petrenko L. A. and Kozlov I. E. Variability of the Marginal Ice Zone and Eddy Generation in Fram Strait and near Svalbard in Summer Based on Satellite Radar Observations // *Physical Oceanography*. — 2023b. — Vol. 30, no. 5. — P. 594–611. — EDN: [QZZVDD](https://www.edn.ru/qzzvdd).
- Pisarev S. V. Review of the Barents sea hydrological conditions // *The Barents Sea System*. — M. : GEOS, 2021. — P. 153–166. — [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(13\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(13)). — (In Russian).
- Review of Hydrometeorological Processes in the North Polar Region. 2022 / ed. by A. S. Makarov. — St. Petersburg : AARI, 2023. — P. 79. — (In Russian).
- Robinson I. S. Tidal vorticity and residual circulation // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. — 1981. — Vol. 28, no. 3. — P. 195–212. — [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90062-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90062-5).

- Yulin A. V., Vyazigina N. A. and Egorova E. S. Interannual and Seasonal Variability of Arctic Sea Ice Extent According to Satellite Observations // Russian Arctic. — 2019. — No. 7. — P. 28–40. — <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>. — (In Russian).
- Zimmerman J. T. F. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. — 1978. — Vol. 11, no. 1. — P. 35–47. — <https://doi.org/10.1080/03091927808242650>.