Спутниковые наблюдения вихрей и фронтальных зон Баренцева моря в годы с различной ледовитостью

А.А. Коник^{1,3}, И.Е. Козлов², А.В. Зимин^{1,3}, О.А. Атаджанова¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117218, Россия E-mail: konikrshu@gmail.com

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299001, Россия ³ Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия

В работе на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений и осреднённых полей температуры морской поверхности исследуется связь вихревых структур Баренцева моря с положением основных фронтальных зон в летние периоды 2007 и 2009 гг., отличавшиеся фоновыми ледовыми условиями. Средняя величина горизонтального градиента температуры для Прикромочной и Полярной фронтальных зон составила 0,04 °C/км, а их ширина варьировалась в пределах от 75 до 136 км. За период исследований идентифицировано 1135 вихревых структур. Результаты анализа спутниковых данных выявили преобладание вихрей с циклоническим типом проявления в оба года. Показано, что в 2009 г. количество вихрей, наблюдаемых в границах фронтальных зон, в два раза превышало их число в 2007 г. В целом количество вихрей внутри фронтальных зон Баренцева моря не превосходит 26 % от их общего числа. Этот факт свидетельствует, что, помимо возникновения вихрей на фронтах, вероятной причиной генерации остальных вихрей может оказаться взаимодействие фоновых течений с неоднородным рельефом дна и полем приводного ветра.

Ключевые слова: океанские вихри, радиолокатор с синтезированной апертурой, температура морской поверхности, фронтальные зоны, Баренцево море, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 17.08.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201

Введение

В арктическом регионе наблюдаются различные климатические изменения, наиболее ярким и обсуждаемым из которых стало значительное уменьшение площади ледового покрова не только в летний, но и в зимний период (Ivanov et al., 2012; Serreze, Stroeve, 2015). Сокращение площади ледяного покрова оказывает существенное влияние на пространственно-временную изменчивость основных фронтальных зон, вблизи которых часто наблюдается интенсивное вихреобразование (Костяной и др., 1992). Кроме того, в различных районах Северного Ледовитого океана (СЛО) образование вихрей разного масштаба оказывается неотъемлемой частью общей динамики основных пограничных течений (Bashmachnikov et al., 2020; Hattermann et al., 2016; Kozlov et al., 2019a; Padman et al., 1990; Våge et al., 2014).

Фронтальная динамика Баренцева моря характеризуется двумя основными фронтальными зонами: Прикромочной и Полярной. Основная природа формирования Прикромочной фронтальной зоны заключается в образовании линзы холодных вод в районе таяния арктической ледовой кромки (Николаев и др., 1986; Day et al., 2014). Полярная фронтальная зона образуется за счёт адвекции тёплых атлантических вод в районы с отличающимися по своим характеристикам баренцевоморскими водами (Глуховец и др., 2014; Oziel et al., 2016). В последних исследованиях (Barton et al., 2018; Fer, Drinkwater, 2014) представлено положение Полярного фронта, частично описаны его характеристики по результатам модельных и экспедиционных исследований. На современном этапе идёт изучение синоптической изменчивости фронтальных зон Баренцева моря (Зимин и др., 2018). Однако изменчивость характеристик и местоположения фронтальных зон в годы с различной фоновой ледовитостью акватории моря до сих пор мало изучена. Как известно, на границах фронтов за счёт обострения горизонтальных градиентов плотности на поверхности и турбулентного перемешивания в пограничном слое формируются меандры и вихревые структуры различных масштабов (Ikeda et al., 1989; Manucharyan, Timmermans, 2014; Mysak, Schott, 1997; Sullivan, McWilliams, 2017). В работе (Костяной и др., 1992) представлены результаты регистрации вихревых диполей в районе Полярной фронтальной зоны. По данным спутниковых радиолокационных (РЛ) наблюдений в отдельных арктических морях ранее неоднократно отмечалась регистрация вихрей вблизи фронтальных зон (Atadzhanova, Zimin, 2019; Atadzhanova et al., 2017). При этом количественные оценки и физико-географические особенности распространения малых вихрей (*O*(1 км)) в области синоптических фронтальных зон Баренцева моря в условиях меняющегося климата являются недостаточно исследованными.

Данные о ледовом покрове Арктики последнего десятилетия показывают общую тенденцию его уменьшения (Feltham, 2015). Отличительными годами, в которые ледовый покров для всей акватории СЛО был наименьшим, стали 2007, 2012 и 2016 (Serreze, Meier, 2018). Из этого периода несколько выделяется 2009 г., характеризующийся относительно высокой площадью ледового покрова (Национальный центр данных по исследованию снега и льда США (National Snow and Ice Data Center — NSIDC, https://nsidc.org). В Баренцевом море разница в площади и концентрации ледового покрова между 2007 и 2009 гг. была не столь существенной (*рис. 1a*, δ), однако положение кромки льда в августе 2009 г. наблюдалось значительно южнее её положения в августе 2007 г. (Spreen et al., 2008).



Рис. 1. Среднемесячная концентрация ледового покрова за август: *a* — 2007 г.; *б* — 2009 г.

В связи с этим представляется интересным рассмотреть отличия в общем распределении вихрей (их количестве и местоположении) и возможную связь этих отличий с положением фронтальных зон Баренцева моря в летний период 2007 и 2009 гг.

Данные и методы

В настоящей работе рассматриваются характеристики вихревых структур Баренцева моря в августе 2007 и 2009 гг. Этот месяц выбран исходя из того, что он характеризуется высокой встречаемостью вихревых структур в данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA) в различных районах Арктики (Артамонова и др., 2020; Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2019a, b), а также большой площадью открытой воды в районе исследований (см. *puc. la*, δ).

Для регистрации проявлений вихревых структур в Баренцевом море за август 2007 и 2009 гг. выполнен анализ 655 РЛИ со спутника Envisat (Environmental Satellite) PCA ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) в С-диапазоне и режимах съёмки WSM (Wide Swath Medium Resolution) (ширина полосы обзора — 400 км, пространственное разрешение — 150 м) и IMP (Image Mode) (100 км и 25 м соответственно). На *рис. 2* представлены карты покрытия района исследований спутниковой РЛ-съёмкой, согласно которым максимальное покрытие (более 45 РЛИ) наблюдается для районов к северу от арх. Шпицберген и в окрестности арх. Земля Франца Иосифа (далее — арх. 3ФИ). В центральной и южной частях Баренцева моря покрытие составляет не более 25–30 РЛИ. Кроме того, общее покрытие РЛ-съёмкой в августе 2007 и 2009 гг. существенно различается: в августе 2009 г. оно примерно в 1,5 раза выше на всей акватории. Анализ спутниковых РЛИ и выделение вихревых структур проводились в среде MathWorks ©Matlab согласно методике, описанной в работах (Kozlov et al., 2019a, b).



Рис. 2. Карты покрытия спутниковыми изображениями акватории Баренцева моря за август: *a* — 2007 г.; *б* — 2009 г. Штрих-пунктиром показано положение кромки ледового покрова

Для идентификации фронтальных зон на поверхности Баренцева моря были использованы поля температуры морской поверхности GHRSST OSTIA (Group for High Resolution Sea Surface Temperature Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) (Donlon et al., 2012) за август 2007 и 2009 гг. с разрешением 0,05° по широте и долготе. С использованием методики, представленной в работе (Ожигин и др., 2016), по полученным данным строились совмещённые карты рассчитанных градиентов и изолиний температуры поверхности моря (ТПМ). Согласно методике, описанной в публикации (Коник и др., 2019), для оценки количественных характеристик фронтальных разделов проведены два меридиональных разреза в центральной и восточной частях моря. Далее максимальные градиенты ТПМ выбирались в качестве положения основного фронтального раздела внутри фронтальной зоны. По данным двух разрезов также определялись средняя ширина фронтальной зоны и максимальный средний градиент ТПМ на фронте по декадам августа.

Результаты работы

На основе анализа полученных результатов была сформирована *таблица* с характеристиками вихревых структур и фронтальных зон за август 2007 и 2009 гг.

Основные характеристики вихрей и фронтальных зон (ФЗ) Баренцева моря за август 2007 и 2009 гг. Аz — вихри с антициклоническим знаком проявления, С — с циклоническим

Год	Общее коли-		Общее количе-	Средний диа-			Прикромочная ФЗ		Полярная ФЗ	
	чество вихрей		ство вихрей на	метр, км		, KM	Макс. грали-	Срелняя	Макс. грали-	Срелняя
	Az	С	границах ФЗ	Az	C	Общий	ент, °С/км	ширина, км	ент, °С/км	ширина, км
2007	156	366	68	3,5	3,7	3,6	0,02	84	0,04	136
2009	130	483	160	6	7,1	6,2	0,04	75	0,02	90

Из *таблицы* видно, что количество зарегистрированных вихревых структур в оба рассматриваемых года различается незначительно и составляет 522 вихря в 2007 г. и 613 — в 2009 г. Однако общее количество вихревых структур на границах фронтальных зон различается более чем в два раза и составляет 68 вихрей в 2007 г. и 160 — в 2009 г. Можно также видеть, что циклонические вихри количественно превалируют над антициклоническими вне зависимости от ледовой обстановки в Баренцевом море. В свою очередь, наблюдаются и существенные различия в характеристиках вихрей. Так, отмечается почти двукратное увеличение среднего диаметра вихрей в 2009 г.: 6,2 км по сравнению с 3,6 км в 2007 г. Это связано, по-видимому, с межгодовыми изменениями стратификации и увеличением перепада плотности в верхнем слое моря за счёт таяния ледового покрова на большей площади, а также с вариациями поступления атлантических вод в Баренцево море.

Как видно на *рис. За*, δ (см. с. 195), местоположение вихревых структур сильно неоднородно по пространству как за каждый отдельный год, так и при сопоставлении данных 2007 и 2009 гг. между собой. Если в 2007 г. основные районы встречаемости вихрей расположены в северной части Баренцева моря, к югу от арх. Шпицберген и вблизи арх. ЗФИ, то в августе 2009 г. вихревые структуры регистрировались более однородно, но с преобладанием в западной части моря. Из *рис. 3* также видно, что значительное количество вихрей в оба года наблюдалось вблизи районов с меняющейся донной топографией, на отмелях (например, недалеко от Шпицбергенской банки), а также вблизи изобаты 200 м.

На *рис. Зв*, *г* показано распределение количества вихрей на квадрат сетки. В 2007 г. максимальная концентрация вихрей отмечается в северной части моря, западнее арх. ЗФИ (более 20 вихрей), а в 2009 г. — в районе к востоку от арх. Шпицберген. Для сопоставления интенсивности вихреобразования в районе исследований в годы с различной ледовитостью были построены карты повторяемости вихрей (*рис. 3д, е*), рассчитанные в качестве отношения количества зарегистрированных вихрей на квадрат сетки к количеству РСА-наблюдений данного квадрата. Как видно, в 2007 г. частота встречаемости вихревых структур варьируется от 0,1–0,2 в центральной части моря до 0,4–0,5 вблизи арх. Шпицберген, арх. ЗФИ и Горла Белого моря. В 2009 г. вихри более широко распределены по акватории моря, большая их часть наблюдается на западе, а среднее значение повторяемости составляет 0,1–0,2 (максимум 0,4).

Для выделения положения фронтальных зон построены карты градиентов температуры поверхности Баренцева моря в годы с разным ледовым покровом (*puc. 4a*, *б*, см. с. 196). Максимальные градиенты наблюдаются к югу от арх. Шпицберген и вблизи границ ледовой кромки. Полученные карты градиентов ТПМ и значения ТПМ вдоль меридиональных разрезов в центральной и восточной частях моря дали возможность выделить и определить характеристики двух основных фронтальных зон: Прикромочной и Полярной (*puc. 4в*, *г*).

Прикромочная фронтальная зона в оба года идёт от арх. Шпицберген, пересекает море в северной части, проходя рядом с арктическим ледовым покровом, и далее выделяется рядом с арх. ЗФИ. В 2007 г. отмечается значительная декадная изменчивость положения фронта, в то время как в 2009 г. площадь изменчивости фронта гораздо меньше.



Рис. 3. Пространственное распределение характеристик вихревых структур на акватории Баренцева моря в 2007 и 2009 гг.: *а*, *б* — положение вихревых структур; *в*, *г* — количество вихрей на квадрат сетки; *д*, *е* — повторяемость вихрей на квадрат сетки



Рис. 4. Градиенты ТПМ Баренцева моря (°С/км) в августе 2007 г. (а) и 2009 г. (б). Декадные положения Прикромочного и Полярного фронтов и вихрей (чёрные точки) за август 2007 г. (в) и 2009 г. (г). Среднемесячная изменчивость градиента ТПМ в районе Прикромочного и Полярного фронтов на разрезах 35 и 50° в.д.: в августе 2007 г. (д) и 2009 г. (е). На рис. 4в, г: красная линия — 1-я декада, чёрная — 2-я декада, синяя — 3-я декада; 50-километровая область изменчивости: голубая линия — Прикромочного фронта, розовая — Полярного фронта; сплошные чёрные линии — меридиональные разрезы 35 и 50° в.д. На рис. 4д, е: чёрная линия — разрез в 2007 г., пунктирная линия — разрез в 2009 г., чёрная прямая — климатический градиент ТПМ Баренцева моря

Средняя ширина фронтальной зоны (см. *таблицу*) по данным двух меридиональных разрезов в 2007 г. составила 84 км, а в 2009 г. — 75 км. Максимальный средний градиент во фронтальной зоне в августе 2007 г. имел значение 0,02 °C/км, а в августе 2009 г. — 0,04 °C/км (*puc. 40, e*).

Полярная фронтальная зона в годы с разными ледовыми условиями выделяется в центральной части моря, начинаясь в районе о. Медвежий. Далее в зависимости от сезона и ледовых условий она может иметь как более интенсивную динамику (2007), так и квазистационарное положение (2009). Средняя ширина фронтальной зоны (см. *таблицу*) по данным двух меридиональных разрезов в августе 2007 г. составила 136 км, а в августе 2009 г. — 90 км. Максимальный средний градиент в Полярной фронтальной зоне в августе 2007 г. имел значение 0,04 °C/км, а в августе 2009 г. — 0,02 °C/км (см. *рис. 4д, е*).

Стоит отметить, что по разрезу вдоль 35° в.д. Полярная фронтальная зона в 2007 г. выделяется гораздо севернее — в районе 76° с.ш., в то время как пик градиента ТПМ Прикромочной фронтальной зоны имеет схожее с 2009 г. положение (см. *рис.* 4*д*, *e*). По разрезу вдоль 50° в.д. также видны пики градиентов температуры Прикромочной и Полярной фронтальных зон, хотя их значения ниже, чем средний максимальный градиент за весь месяц.

Композитные карты, представленные на *рис.* 48, г, дают возможность оценить количество вихревых структур, идентифицированных в границах районов пространственной изменчивости фронтальных зон в годы с разной ледовой обстановкой. В 2007 г. внутри обеих фронтальных зон обнаружено 68 вихревых структур, что составляет 13 % от их общего числа на всей акватории моря, а в 2009 г. — 160 вихревых структур (26 %). Стоит отметить, что в 2009 г. часть вихревых структур отмечалась вблизи не выделенных в данной работе менее резких по значению градиента ТПМ фронтальных зон, например в южной части Баренцева моря. При этом значительная часть выделенных за оба года вихрей находится вне областей пространственной изменчивости фронтов. Их генерация, по-видимому, обусловлена иными механизмами, например сдвиговой неустойчивостью фоновых течений, их взаимодействием с неоднородностями рельефа дна, неоднородностями в поле приводного ветра и др. (см., например, работу (Zatsepin et al., 2019)).

Заключение

В ходе работы для акватории Баренцева моря рассмотрены особенности пространственного распределения вихрей в августе 2007 и 2009 гг. и их возможная связь с положением основных фронтальных зон. За счёт более полного покрытия спутниковой съёмкой 2009 г. оказался более репрезентативным с точки зрения однородности пространственной информации о поле вихрей по сравнению с 2007 г. Всего в ходе исследования зарегистрировано 1135 вихрей, из которых 522 вихря — в 2007 г., 613 вихрей — в 2009 г. Вне зависимости от фоновой ледовой обстановки в Баренцевом море в оба года преобладали вихревые структуры с циклоническим типом проявления. Средний диаметр вихрей в 2007 г. составил 3,6 км, а в 2009 г. — 6,2 км. Чаще всего вихревые структуры наблюдались в районах с неоднородной донной топографией, например вблизи Шпицбергенской банки и арх. Земля Франца-Иосифа.

По данным спутниковых наблюдений, в 2009 г. количество вихрей в границах фронтальных зон было в два раза больше их количества в 2007 г. Поскольку общая ледовитость в Баренцевом море в 2009 г. была выше, можно предположить, что из-за уменьшения поступления разрозненных вод и менее выраженной вертикальной устойчивости толщина верхнего однородного слоя увеличилась, особенно в Прикромочной фронтальной зоне. Всё это в совокупности могло привести к генерации вихрей больших диаметров по всей акватории Баренцева моря.

Очевидно, что для установления механизмов генерации наблюдаемых вихрей необходимы комплексные исследования, включающие совместный анализ спутниковых и судовых измерений, которые позволят получить детальную информацию о горизонтальной и вертикальной структуре вихрей, их эволюции и динамических характеристиках. Обработка и анализ спутниковых PCA-данных выполнены в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-35-20078 мол_а_вед. Обработка данных по температуре морской поверхности с целью выделения положения фронтальных зон проведена в рамках государственного задания по теме № 0149-2019-0015.

Литература

- 1. *Артамонова А. В., Козлов И. Е., Зимин А. В.* Характеристики вихрей в Чукотском море и море Бофорта по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 203–210.
- 2. *Глуховец Д. И., Гольдин Ю. А.* Исследование биоптических характеристик вод Карского моря с использованием данных спутниковых и судовых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 346–350.
- 3. Зимин А. В., Коник А.А., Атаджанова О.А. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Баренцева моря // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2018. № 51. С. 99–108.
- 4. *Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А.* Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 1. С. 54–61.
- 5. *Костяной А. Г., Лебедев И.А., Новиков В. Б., Родионов В. Б.* О вихреобразовании в Полярной фронтальной зоне Баренцева моря // Тр. Аркт. и антаркт. научно-исследоват. ин-та. 1992. Т. 426. С. 19–32.
- 6. *Николаев Ю. В., Макштас А. П., Иванов Б. В.* К проблеме изучения Прикромочных зон арктических морей // Тр. Аркт. и антаркт. научно-исследоват. ин-та. 1986. Т. 406. С. 131–138.
- 7. *Ожигин В.К., Ившин В.К., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю.* Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 216 с.
- 8. *Atadzhanova O.A., Zimin A. V.* Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2019. V. 12. No. 3. P. 36–45.
- 9. *Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E.* Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. 2017. V. 2. P. 75–83.
- 10. *Barton B. I., Lenn Y. D., Lique C.* Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice // J. Physical Oceanography. 2018. V. 48. No. 8. P. 1849–1866.
- 11. *Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., Glock N. I., Wekerle C.* Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. Iss. 7. Art. No. e2019JC015832. 40 p. DOI: 10.1029/2019JC015832.
- 12. Day J. J., Tietsche S., Hawkins E. Pan-arctic and regional sea ice predictability: Initialization month dependence // J. Climate. 2014. V. 27. No. 12. P. 4371–4390.
- Donlon C. J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 116. P. 140–158.
- 14. *Feltham D.* Arctic sea ice reduction: the evidence, models and impacts // Philosophical Trans. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. V. 373. No. 2045. Art. No. 20140171. 3 p.
- 15. *Fer I., Drinkwater K.* Mixing in the Barents Sea Polar Front near Hopen in spring // J. Marine Systems. 2014. V. 130. P. 206–218.
- 16. *Hattermann T., Isachsen P.E., Von Appen W.J., Albretsen J., Sundfjord A.* Eddy-driven recirculation of Atlantic Water in Fram Strait // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. No. 7. P. 3406–3414.
- 17. *Ikeda M., Johannessen J. A., Lygre K., Sandven S.* A process study of mesoscale meandres and eddies in the Norwegian Coastal Current // J. Geophysical Research. 1989. V. 19. No. 1. P. 20–35.
- 18. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Repina I., Koldunov N.V., Smirnov A.* Tracing Atlantic Water Signature in the Arctic Sea Ice Cover East of Svalbard // Advances in Meteorology. 2012. V. 2012. Art. ID 201818. 11 p.
- Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A.A. (2019a) Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. No. 9. P. 6601–6616.
- 20. *Kozlov I. E., Petrenko L.A., Plotnikov E. V.* (2019b) Statistical and dynamical properties of ocean eddies in Fram Strait from spaceborne SAR observations // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. Art. No. 111500S. 7 c. DOI: 10.1117/12.2533317.
- 21. *Manucharyan G. E., Timmermans M. L.* Generation and separation of mesoscale eddies from surface ocean fronts // J. Physical Oceanography. 2014. V. 43. No. 12. P. 2545–2562.

- 22. *Mysak L.A., Schott B.* Evidence for baroclinic instability of the Norwegian Current // J. Geophysical Research. 1997. V. 82. P. 2087–2095.
- 23. *Oziel L., Sirven J., Gascard J.C.* The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science. 2016. V. 12. No. 1. P. 169–184.
- 24. *Padman L., Levine M., Dillon T., Morison J., Pinkel R.* Hydrography and microstructure of an Arctic cyclonic eddy // J. Geophysical Research: Ocean. 1990. V. 95. P. 707–719.
- 25. *Serreze M. C., Meier W. N.* The Arctic's sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic // Annals of the New York Academy of Sciences. 2018. P. 1–18.
- Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Science. 2015. V. 373. No. 2045. Art. No. 20140159. 16 p.
- 27. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // J. Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. Iss. C2. Art. No. C02S03. 12 p.
- 28. *Sullivan P.P., McWilliams J. C.* Frontogenesis and frontal arrest of a dense filament in the oceanic surface boundary layer // J. Fluid Mechanics. 2017. V. 837. P. 341–380.
- 29. Våge S., Basedow S. L., Tande K. S., Zhou M. Physical structure of the Barents Sea Polar Front near Storbanken in August 2007 // J. Marine Systems. 2014. V. 130. P. 256–262.
- Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A., Elkin D., Kukleva O. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea // Ocean Dynamics. 2019. V. 69. P. 253–266.

Satellite observations of eddies and frontal zones in the Barents Sea during years of different ice cover properties

A. A. Konik^{1,3}, I. E. Kozlov², A. V. Zimin^{1,3}, O. A. Atadzhanova¹

 ¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117218, Russia E-mail: konikrshu@gmail.com
² Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299001, Russia
³ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

In this paper, based on the analysis of satellite radar images and averaged sea surface temperature fields, we study the relationship between the eddy structures of the Barents Sea and the position of the main frontal zones in the summer of 2007 and 2009, where different ice conditions are observed. We considered the Marginal Ice frontal area and the Polar front that are characterized by horizontal temperature gradient of 0.04 °C/km and width of 75–136 km. Altogether 1135 eddies were identified in the data. It was shown that in 2009 the number of eddies observed in the boundaries of the frontal zones were twice as high as in 2007. In general, the number of eddies inside the frontal zones did not exceed 26 % in the Barents Sea, meaning that the reason for the generation of other eddies may be their generation mechanisms, probably related to inhomogeneity of the bottom relief and driving wind fields.

Keywords: ocean eddies, synthetic aperture radar, sea surface temperature, frontal zones, Barents Sea, Arctic Ocean

Accepted: 17.08.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201

References

1. Artamonova A. V., Kozlov I. E., Zimin A. V., Kharakteristiki vikhrei v Chukotskom more i more Boforta po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh nablyudenii (Characteristics of ocean eddies in the Beaufort and Chukchi Seas from spaceborne radar observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 203–210.

- 2. Glukhovets D. I., Goldin Yu. A., Issledovanie biopticheskikh kharakteristik vod Karskogo morya s ispol'zovaniem dannykh sputnikovykh i sudovykh nablyudenii (A study of the bio-optical properties of the Kara Sea using satellite data and shipboard measurements), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 346–350.
- 3. Zimin A. V., Konik A. A., Atadzhanova O. A., Kolichestvennye otsenki izmenchivosti kharakteristik temperatury poverkhnosti morya v raione frontal'nykh zon Barentseva morya (Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea surface in the front of the frontal zone of the Barents Sea), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2018, No. 51, pp. 99–108.
- 4. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Kolichestvennye otsenki izmenchivosti kharakteristik temperatury poverkhnosti morya v raione frontal'nykh zon Karskogo morya (Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea surface in the front of the frontal zone of the Kara Sea), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 54–61.
- 5. Kostyanoi A. G., Lebedev I. A., Novikov V. B., Rodionov V. B., O vikhreobrazovanii v Polyarnoi frontal'noi zone Barentseva morya (About vortex formation in the polar frontal zone of the Barents Sea), *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, 1992, Vol. 426, pp. 19–32.
- 6. Nikolaev Yu. V., Makshtas A. P., Ivanov B. V., K probleme izucheniya Prikromochnykh zon arkticheskikh morei (About the problem of studying the Border zones of the Arctic seas), *Trudy Arkticheskogo i antark-ticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, 1986, Vol. 406, pp. 131–138.
- 7. Ozhigin V.K., Ivshin V.K., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu., *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* (The Barents Sea Water: structure, circulation, variability), Murmansk: PINRO, 2016, 216 p.
- 8. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data, *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 36–45.
- 9. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Kozlov I.E., Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 2, pp. 75–83.
- 10. Barton B. I., Lenn Y. D., Lique C., Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice, *J. Physical Oceanography*, 2018, Vol. 48, No. 8, pp. 1849–1866.
- 11. Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., Glock N. I., Wekerle C., Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, Vol. 125, Issue 7, Art. No. e2019JC015832, 40 p., DOI: 10.1029/2019JC015832.
- 12. Day J. J., Tietsche S., Hawkins E., Pan-arctic and regional sea ice predictability: Initialization month dependence, *J. Climate*, 2014, Vol. 27, No. 12, pp. 4371–4390.
- Donlon C. J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W., The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 116, pp. 140–158.
- 14. Feltham D., Arctic sea ice reduction: the evidence, models and impacts, *Philosophical Trans. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, Vol. 373, No. 2045, Art. No. 20140171. 3 p.
- 15. Fer I., Drinkwater K., Mixing in the Barents Sea Polar Front near Hopen in spring, J. Marine Systems, 2014, Vol. 130, pp. 206–218.
- 16. Hattermann T., Isachsen P. E., Von Appen W.J., Albretsen J., Sundfjord A., Eddy-driven recirculation of Atlantic Water in Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, No. 7, pp. 3406–3414.
- 17. Ikeda M., Johannessen J.A., Lygre K., Sandven S., A process study of mesoscale meandres and eddies in the Norwegian Coastal Current, *J. Geophysical Research*, 1989, Vol. 19, No. 1, pp. 20–35.
- 18. Ivanov V. V., Alexeev V. A., Repina I., Koldunov N. V., Smirnov A., Tracing Atlantic Water Signature in the Arctic Sea Ice Cover East of Svalbard, *Advances in Meteorology*, 2012, Vol. 2012, Art. ID 201818, 11 p.
- 19. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A. (2019a), Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, No. 9, pp. 6601–6616.
- 20. Kozlov I. E., Petrenko L. A., Plotnikov E. V. (2019b), Statistical and dynamical properties of ocean eddies in Fram Strait from spaceborne SAR observations, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, Art. No. 111500S, 7 p.
- 21. Manucharyan G. E., Timmermans M. L., Generation and separation of mesoscale eddies from surface ocean fronts, *J. Physical Oceanography*, 2014, Vol. 43, No. 12, pp. 2545–2562.
- 22. Mysak L.A., Schott B., Evidence for baroclinic instability of the Norwegian Current, J. Geophysical Research, 1997, Vol. 82, pp. 2087–2095.
- 23. Oziel L., Sirven J., Gascard J.C., The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011), *Ocean Science*, 2016, Vol. 12, No. 1, pp. 169–184.
- 24. Padman L., Levine M., Dillon T., Morison J., Pinkel R., Hydrography and microstructure of an Arctic cyclonic eddy, *J. Geophysical Research: Ocean*, 1990, Vol. 95, pp. 707–719.

- 25. Serreze M. C., Meier W. N., The Arctic's sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2018, 18 p.
- 26. Serreze M.C., Stroeve J., Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 2015, Vol. 373, No. 2045, Art. No. 20140159, 16 p.
- 27. Spreen G., Kaleschke L, Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels, J. *Geophysical Research: Ocean*, 2008, Vol. 113, Issue C2, Art. No. C02S03, 12 p.
- 28. Sullivan P. P., McWilliams J. C., Frontogenesis and frontal arrest of a dense filament in the oceanic surface boundary layer, *J. Fluid Mechanics*, 2017, Vol. 837, pp. 341–380.
- 29. Våge S., Basedow S. L., Tande K. S., Zhou M., Physical structure of the Barents Sea Polar Front near Storbanken in August 2007, *J. Marine Systems*, 2014, Vol. 130, pp. 256–262.
- Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A., Elkin D., Kukleva O., Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea, *Ocean Dynamics*, 2019, Vol. 69, pp. 253–266.