Характеристики вихрей у архипелага Шпицберген и в проливе Фрама по данным спутниковых РСА-наблюдений в летний период

Л. А. Петренко, И. Е. Козлов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: larcpetr@gmail.com, igor.eko@gmail.com

На основе анализа спутниковых радиолокационных данных Envisat ASAR в июле – сентябре 2007 г. выполнена регистрация поверхностных проявлений вихревых структур у арх. Шпицберген и в проливе Фрама. В ходе работы идентифицировано около 3000 таких проявлений, определены ключевые районы наблюдения вихрей, их повторяемость, диаметры и знак вращения. Показано, что наиболее часто вихри наблюдаются в многочисленных фьордах арх. Шпицберген, к западу и северо-западу от него, в проливе Стур-Фьорд на юго-востоке архипелага, вблизи о. Медвежий, а также вдоль всей прикромочной зоны пролива Фрама и Гренландского моря. Большинство вихрей имеет циклонический тип вращения и наблюдается над глубинами менее 400 м. Диаметры вихрей колеблются от 0,5 до 65 км. Вихри с диаметрами более 10 км наблюдаются над глубоководными участками, а в шельфовых районах преобладают вихри с диаметром 3–7 км. Общая картина распределения вихрей отражает расположение основных течений в районе исследований. Сопоставление размеров вихрей с климатическими оценками радиуса деформации Россби в летний период показало, что большинство наблюдаемых вихрей относится к субмезомасштабу.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, пролив Фрама, архипелаг Шпицберген, спутниковые радиолокационные изображения, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 18.09.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-167-177

Введение

Мезомасштабные и субмезомасштабные вихри играют ключевую роль в процессах перемешивания и переносе водных масс, тепла, соли и питательных веществ, а также оказывают значительное воздействие на биогеохимические циклы в Арктике (Fine et al., 2018; Mensa et al., 2018; Niebauer, Smith, 1989; Watanabe et al., 2014). Однако детальная информация о характеристиках вихрей часто ограничена как вследствие недостаточности, так и из-за пространственной и временной неоднородности *in situ* наблюдений в Северном Ледовитом океане (СЛО). Использование методов спутниковой океанографии, в частности измерений радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), данные которых обладают высоким пространственным разрешением и не зависят от условий облачности и освещённости, делает возможным решение подобных задач (Артамонова и др., 2020; Зимин и др., 2016; Коник и др., 2020; Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2019a).

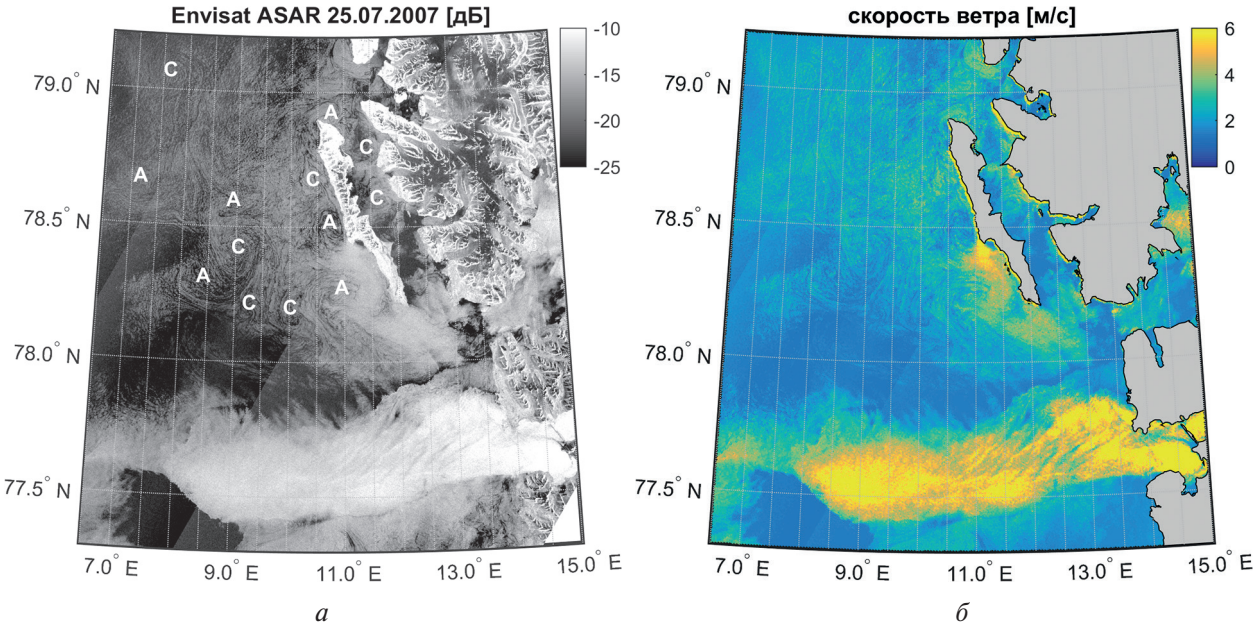
К настоящему времени в различных районах СЛО и внутренних морях России уже проводились исследования механизмов генерации, характеристик и повторяемости вихрей различной природы по данным дистанционного зондирования (Атаджанова, Козлов, 2020; Bashmachnikov et al., 2020; Karimova, Gade, 2016; Karimova et al., 2012; Kozlov et al., 2020; Mityagina et al., 2010; Zatsepin et al., 2019).

Пролив Фрама (ПФ) и акватории, прилегающие к арх. Шпицберген, в данном контексте также представляют большой интерес. Результаты математического моделирования на основе региональных вихреразрешающих моделей в проливе Фрама (Hattermann et al., 2016; Wekerle et al., 2017) продемонстрировали важную роль вихрей в рециркуляции атлантических вод и горизонтальном транспорте тепла в этом районе, определяя тем самым тепловой баланс СЛО. Для валидации таких моделей необходима достоверная информация о характеристиках

вихрей и их пространственно-временной изменчивости в конкретном районе. В связи с этим цель настоящей работы заключается в анализе статистики и пространственной изменчивости параметров вихревых структур в районе пролива Фрама и арх. Шпицберген в летний период.

Данные и методы

В настоящей работе были использованы спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ) свободных ото льда областей пролива Фрама и арх. Шпицберген, полученные РСА ASAR спутника Envisat в С-диапазоне и режимах съёмки WSM (*англ.* Wide Swath Medium Resolution) (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) в июле – сентябре 2007 г., в период с установившимся гидрометеорологическим режимом по летнему типу для рассматриваемой акватории (Захаров, Кононова, 2013). В общей сложности за указанный период проанализировано 366 РЛИ.



а *б*

Рис. 1. Пример влияния скорости приводного ветра на выделение вихревых структур в данных спутниковых РСА: *а* — фрагмент РЛИ Envisat ASAR за 25 июля 2007 г. к западу от арх. Шпицберген с переменным уровнем РЛ-сигнала и выделенными ППВС, отмеченными буквами «А» для антициклонов и «С» для циклонов; *б* — поле скорости ветра, рассчитанное по фрагменту РЛИ на основе модели CMOD-4

Как известно, генерация вихрей сопровождается горизонтальными неоднородностями в поле поверхностных течений и формированием выраженных зон конвергенции и дивергенции течений (см., например, работу (Johannessen et al., 1996)). Взаимодействие ветровых волн с этими течениями и аккумуляция плёнок поверхностно-активных веществ в зонах конвергенции течений приводит к формированию поверхностных проявлений вихрей в виде контрастов «шероховатости» морской поверхности. На РСА-изображениях такие области отображаются в виде выраженных участков более или менее интенсивного относительно фона обратного рассеяния РЛ-сигнала (Gade et al., 2013; Kudryavtsev et al., 2014). Таким образом, идентификация вихрей в РСА-изображениях возможна на основе выделения связанных с ними характерных локальных неоднородностей в поле обратного рассеяния РСА-сигнала, так называемых поверхностных проявлений вихревых структур (ППВС). Следует отметить, что возможность идентификации вихрей в РСА-данных имеет ряд физических и инструментальных ограничений. Ключевым ограничением является скорость приводного

ветра, с ростом которой процент регистрируемых проявлений будет уменьшаться (Karimova, Gade, 2016). Пример выделения вихревых структур на фоне переменного поля ветра приведён на *рис. 1* (см. с. 168), где показан фрагмент РЛИ Envisat ASAR за 25 июля 2007 г. к западу от арх. Шпицберген. Как видно на *рис. 1а*, большинство выделенных ППВС (отмечены буквами А, С на *рис. 1а*) приходится на более тёмные участки РЛИ с низким уровнем обратно-рассеянного РЛ-сигнала. Согласно *рис. 1б*, скорость приводного ветра, восстановленная по РЛИ на основе модели CMOD-4 (Stoffelen, Anderson, 1997), в этих районах находится в диапазоне 2–4 м/с. В то же время отчётливые ППВС отсутствуют в южной части изображения, где значения скорости ветра превышают 6–7 м/с, а также непосредственно в штилевых областях, ещё раз подчёркивая физические ограничения идентификации вихрей в данных спутниковых РСА.

Процедура анализа спутниковых РЛИ проводится в два этапа. На первом изображения подвергаются низкочастотной фильтрации, тем самым исключаются пространственные вариации поля РЛ-сигнала на масштабах РЛИ. На втором этапе выполняется идентификация ППВС и определение их характеристик: координат центра вихря, диаметра, знака вращения, типа проявления и глубины места, соответствующей центру вихря. Пространственное распределение повторяемости вихрей далее определяется в виде отношения общего количества наблюдений вихрей в заданном районе моря к количеству РСА-съёмок данного района в безлёдный период. Идентификация вихрей проводилась на основе программы INTERWAVE (Kozlov et al., 2015), дополненной блоком по выделению вихревых структур и применявшейся ранее в ряде работ (Артамонова и др., 2020; Атаджанова, Козлов, 2020; Kozlov et al., 2019b).

Результаты

В результате обработки 366 РС-изображений за июль – сентябрь 2007 г. было выделено 2954 ППВС, из которых 46 % наблюдений приходится на июль, 34 % — на август, 20 % — на сентябрь. Покрытие района исследований спутниковой РСА-съёмкой показано на *рис. 2* (см. с. 170). Как видно, более информативно были представлены северная и западная части района исследований. Максимальное покрытие РСА-съёмкой (свыше 100 РЛИ) приходится на шельфовую область к северу от арх. Шпицберген, на восточную часть ПФ приходится в среднем около 80 РЛИ (см. *рис. 2*). Минимальная обеспеченность данными наблюдается вблизи кромки льда, где величина покрытия составляет 10–40 изображений за весь период и обусловлена сезонной динамикой прикромочной зоны.

Пространственное распределение всех вихрей, выделенных в рассматриваемом регионе в июле – сентябре 2007 г., отражено на *рис. 3* (см. с. 170). Синим цветом обозначены циклонические вихри, красным — антициклонические, размер маркера пропорционален реальному диаметру вихрей. Как видно, в рассматриваемом регионе вихри наблюдаются практически повсеместно: над глубоководной центральной частью пролива Фрама, над континентальным склоном и шельфом арх. Шпицберген, а также в водах его многочисленных фьордов. Зона проявления вихрей ограничена с севера и северо-запада кромкой поля дрейфующих льдов.

Как видно из *рис. 3*, высокая вихревая активность к западу от архипелага обуславливается сложным взаимодействием выносимых из арктического бассейна тающего льда и холодных распреснённых вод с тёплыми и солёными атлантическими водами Западно-Шпицбергенского течения (ЗШТ). Вихреобразование с восточной стороны Шпицбергена отличается меньшей интенсивностью и связано в основном с границей выноса льдов либо имеет орографическое происхождение. Орографические вихри в водах арх. Шпицберген возникают у мысов, в окрестности больших и малых островов.

В проливе Фрама в районе впадины Моллой (79° с. ш., 3° в. д., глубина >5000 м) вихреобразование происходит постоянно, что неоднократно отмечалось ранее по результатам гидрологических съёмок (Johannessen et al., 1983, 1987). Севернее и южнее впадины проходят две ветви рециркуляции атлантических вод: северная и южная соответственно (Hattermann et al., 2016).

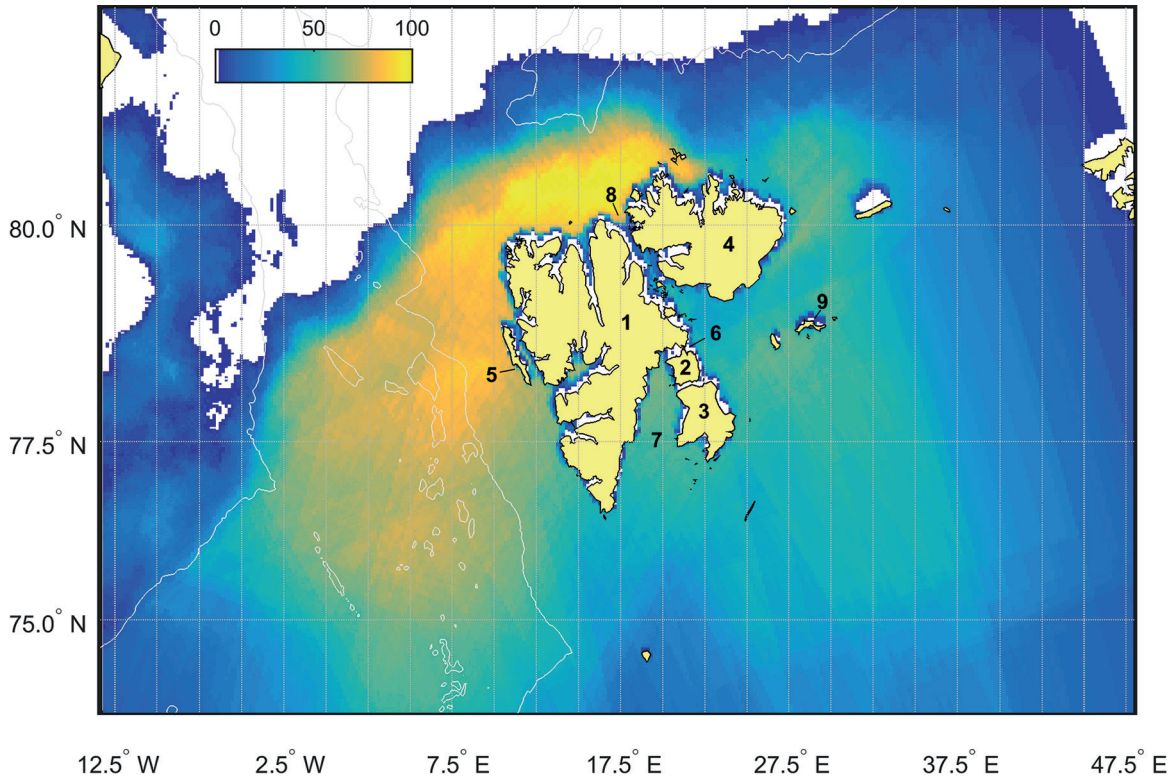


Рис. 2. Покрытие района исследований спутниковой РСА-съёмкой за июль – сентябрь 2007 г. Обозначения: 1 — о. Западный Шпицберген; 2 — о. Баренца; 3 — о. Эдж; 4 — о. Северо-Восточная земля; 5 — о. Земля принца Карла; 6 — пролив Хелейсунн; 7 — пролив Стур-Фьорд; 8 — пролив Хинлопен; 9 — о. Земля короля Карла. Серой линией отмечено положение изобаты 2000 м

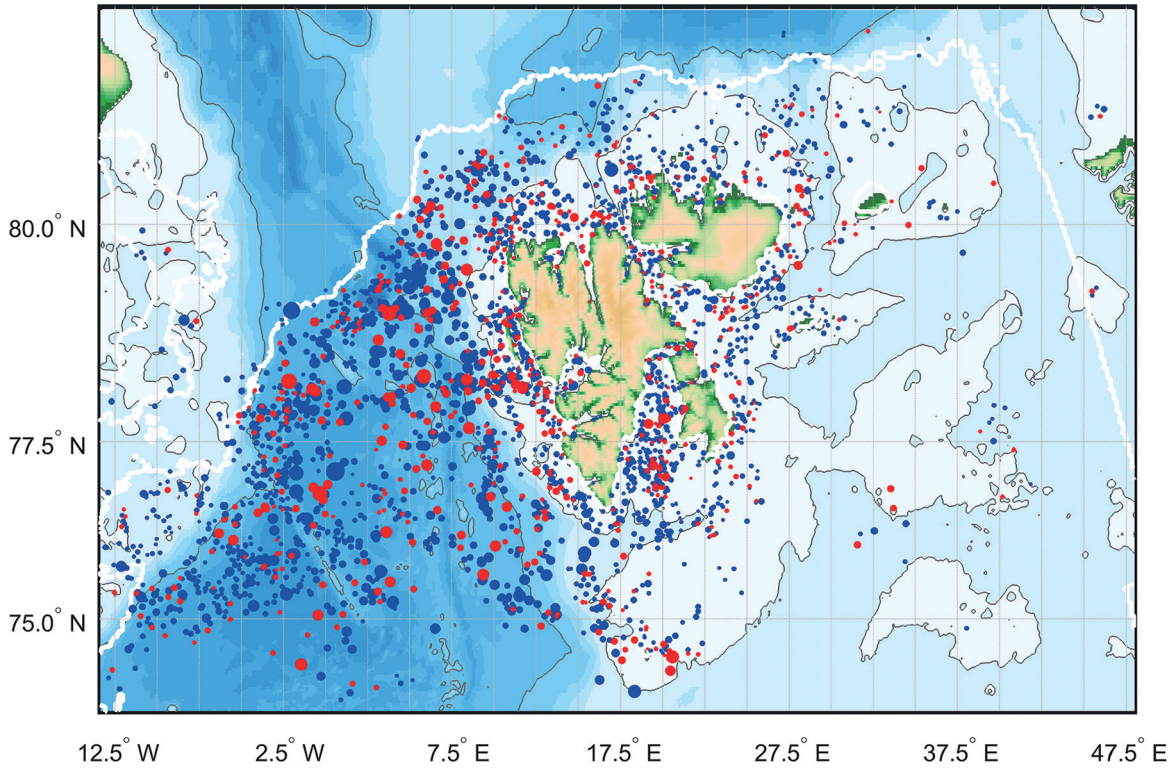


Рис. 3. Пространственное распределение циклонических (синий цвет) и антициклонических (красный цвет) вихрей открытой воды в районе пролива Фрама и арх. Шпицберген по данным спутниковой РСА-съёмки за июль – сентябрь 2007 г. Размер маркера пропорционален диаметру вихрей. Белой линией отмечена граница области РЛ-наблюдений участков открытой воды

Между 20 и 24° в. д. севернее о. Северо-Восточная Земля в первой половине летнего периода практически постоянно существует ледовая «перемычка», связывающая кромку льда на севере с островным припаем. Факт её наличия указывает на место заглубления северо-шпицбергенской ветви ЗШТ, что подтверждается весьма малым количеством вихревых структур севернее 80° с. ш. и далее на восток вплоть до арх. Земля Франца-Иосифа. Вихри также постоянно образуются в предпроливной зоне пролива Хелейсун у о. Баренца (восточная часть арх. Шпицберген) из-за разности уровня моря на концах пролива. Большое количество вихрей также регистрируется в проливе Стур-Фьорд из-за взаимодействия холодных арктических вод, поступающих через проливы Хелейсунн и Фримен, и заходящих с юга вдоль западного берега о. Эдж тёплых атлантических вод.

Южнее архипелага активное вихреобразование происходит над западным склоном Медвежинской банки как в результате неустойчивости струи тёплого течения, так и вследствие топографической генерации над мелководьем под влиянием дрейфовых и приливных течений. Кроме шельфовых областей и районов свала глубин значительная часть вихрей наблюдается над глубоководными зонами ПФ.

На *рис. 4а* показано пространственное распределение общего количества выделенных вихревых структур на регулярной сетке с размером ячейки 50×50 км. Как видно, наибольшая плотность вихрей была выявлена у северо-западной оконечности архипелага и у его западного побережья, особенно в проливе Форланнсуннет между архипелагом и о. Земля Принца Карла. К районам повышенного вихреобразования относится и пролив Стур-Фьорд с плотностью вихрей около 10 на квадрат сетки.

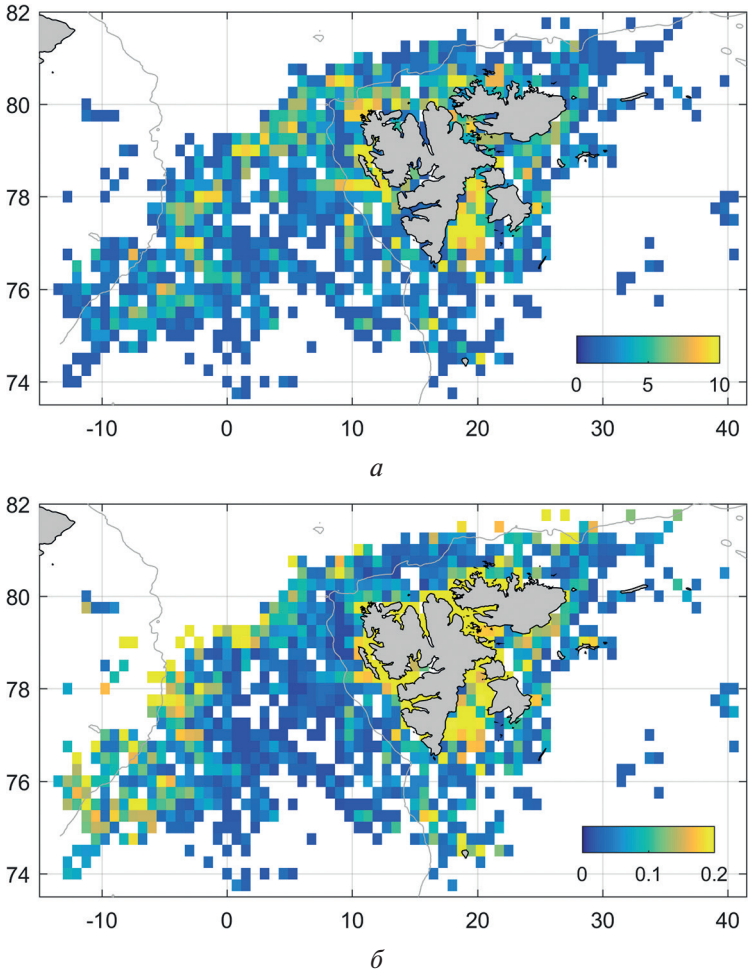
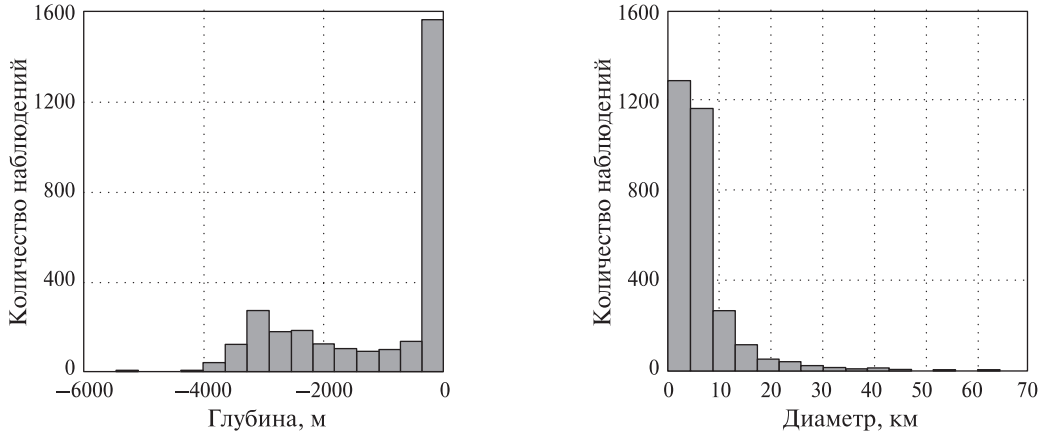


Рис. 4. Пространственное распределение общего количества (*а*) и повторяемости (*б*) вихревых структур на сетке с размером ячейки 50×50 км по данным спутниковых РСА-измерений за июль – сентябрь 2007 г. Серой линией отмечено положение изобаты 500 м

Высокая плотность вихрей имеет место и на участках открытой воды вблизи прикромочной зоны между 5° з. д. и 10° в. д. В этой области положение вихрей совпадает с одной из ветвей рециркуляции атлантических вод, определённой на основе численного моделирования (Hattermann et al., 2016), тем самым подтверждая результаты этой работы. Между 75 и 78° с. ш. имеет место интенсивное вихреобразование не только вблизи прикромочной зоны, но и над шельфом Гренландии, вызванное, по всей видимости, проникновением в этот район атлантических вод с одной из ветвей рециркуляции ЗШТ.

На *рис. 4б* показано поле повторяемости вихрей, которое по своей структуре очень схоже с распределением общего количества вихрей на квадрат сетки (см. *рис. 4а*). При этом нормирование общего количества вихрей на количество РЛ-съёмок в заданном квадрате ещё более подчёркивает высокую повторяемость вихрей внутри многочисленных фьордов арх. Шпицберген, в проливе Стур-Фьорд, севернее и северо-западнее о. Медвежий, а также вдоль всей прикромочной зоны Гренландского моря и ПФ (значения повторяемости >0,2).

На *рис. 5а* приведена гистограмма зависимости количества вихревых образований от глубины в районе их регистрации. Максимальное количество выделенных вихревых структур приходится на глубины до 400 м. Доля вихрей, наблюдавшихся на шельфе (<200 м), составила 43 % от общего количества наблюдений. При относительно равномерном распределении количества вихрей над глубинами от 400 до 2000 м выраженный пик также отмечается над глубинами около 3000 м, что соответствует центральной части пролива Фрама. Среднее (медианное) значение приходится на глубину 1125 м (283 м).



а *б*

Рис. 5. Гистограммы распределения: *а* — глубины районов, над которыми наблюдались проявления вихрей; *б* — диаметров вихревых структур

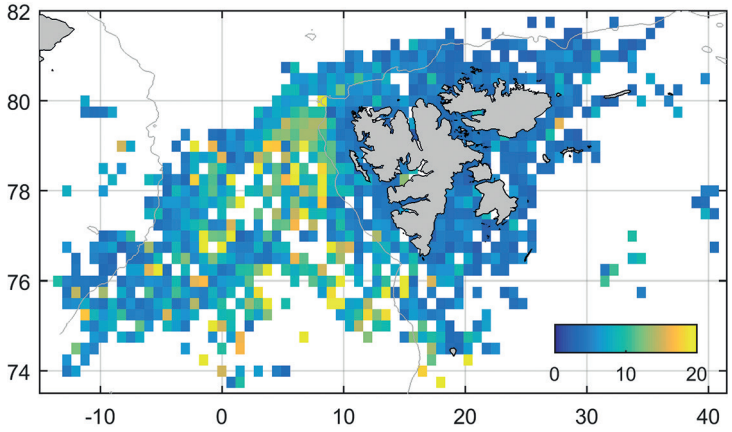


Рис. 6. Пространственное распределение средних значений диаметров вихрей (км), рассчитанных на сетке с размером ячейки 50×50 км. Серой линией отмечено положение изобаты 500 м

На *рис. 5б* представлена гистограмма распределения диаметров вихрей. Минимальное и максимальное значения для этого параметра составили 0,5 и 65 км. Как видно из гистограммы, основная доля наблюдаемых вихрей имеет размеры менее 10 км, составляя 86 % от общего числа наблюдений. Число вихрей диаметром более 20 км составило всего 4 %. Среднее (медианное) значение для этого параметра равно 6,5 км (4,8 км).

На *рис. 6* (см. с. 172) показано пространственное распределение средних значений диаметра вихревых структур, рассчитанных на сетке с размером ячейки 50×50 км. Как видно, вихри с диаметрами в диапазоне 3–7 км преобладают в шельфовых районах арх. Шпицберген. Напротив, вихри со средними значениями диаметра 10–15 км и выше приурочены преимущественно к глубоководным зонам пролива Фрама (см. *рис. 6*). Самые крупные вихри, встречающиеся в пределах шельфа арх. Шпицберген, обычно не превышают 20 км в диаметре, в то время как наблюдаемые над большими глубинами могут достигать в диаметре 50–65 км. Следует отметить, что квазинепрерывная полоса высоких значений вихревых диаметров между 3–10° в. д. и 77–79° с. ш. хорошо согласуется с расположением главной струи ЗШТ и его южной рециркуляционной ветви, установленным по результатам математического моделирования (Hattermann et al., 2016; Wekerle et al., 2017).

Выводы и обсуждение

Пролив Фрама и прилегающие к арх. Шпицберген акватории известны своей сложной динамикой вод, на которую оказывает влияние неоднородная топография, конфигурация берегов, а также изменчивость ветрового воздействия. В результате в этом регионе присутствуют все условия для генерации вихревых структур (Bashmachnikov et al., 2020; Johannessen et al., 1987; Ikeda, 1991; Von Appen et al., 2018; Wekerle et al., 2017; Zatsepin et al., 2019).

Анализ спутниковых данных высокого разрешения позволил выделить ключевые районы вихреобразования в районе исследований. Такие районы наблюдаются внутри многочисленных фьордов арх. Шпицберген, вдоль основной ветви Западно-Шпицбергенского течения и одной из ветвей рециркуляции атлантических вод в проливе Фрама, проходящей вблизи прикромочной зоны, в проливе Стур-Фьорд, а также вблизи о. Медвежий. В рассматриваемом районе были выявлены многочисленные вихревые структуры с диаметрами от 0,5 до 65 км со средним значением по всему массиву 6,5 км. Количество вихрей, имеющих циклонический тип вращения, здесь преобладает над антициклонами — так же, как и в других районах СЛО (Артамонова и др., 2020; Зимин и др., 2016; Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2019a).

Интересно провести сопоставление размеров вихрей, полученных на основе спутниковых измерений, с климатическими величинами радиуса деформации Россби R_o в районе исследований. Согласно работе (Nurser, Bacon, 2014), значения R_o в летний период вблизи прикромочной зоны максимальны и достигают 7 км, в проливе Фрама его величина около 5–6 км, а в проливе Стур-Фьорд — около 2,5–3 км. Спутниковые наблюдения дают среднюю величину радиуса вихрей около 4–5 км вблизи прикромочной зоны, что очевидно меньше радиуса Россби. Над глубоководными районами пролива Фрама радиусы вихрей колеблются в диапазоне 3–20 км. Как показано в работе (Bashmachnikov et al., 2020), малые субмезомасштабные циклонические вихри регистрируются здесь преимущественно на периферии более крупных мезомасштабных антициклонов. Наблюдаемые значения радиусов вихрей в проливе Стур-Фьорд равны 1,5–3 км, т. е. меньше или сравнимы с величиной радиуса Россби. Для остальных шельфовых районов арх. Шпицберген (к западу и северо-западу от архипелага) наблюдаемые размеры вихрей также не превосходят климатические значения R_o. Таким образом, анализ спутниковых РСА-наблюдений позволяет получить информацию о пространственно-временных характеристиках и ключевых районах генерации преимущественно субмезомасштабных вихрей, сведения о которых имеют большое значение для решения различных практических задач на акватории СЛО (Mensa et al., 2018).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-20078-мол_а_вед), а также в рамках государственного задания № 0827-2020-0002.

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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210.
2. *Атаджанова О. А.*, *Козлов И. Е.* Наблюдение вихрей в проливе Фрама и вблизи архипелага Шпицберген по данным спутниковых РСА-измерений в зимний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 182–190.
3. *Захаров В. Г.*, *Кононова Н. К.* Взаимосвязь динамики полей дрейфа льда в арктическом бассейне и циркуляции атмосферы северного полушария (летние сезоны) // Сложные системы. 2013. № 4(9). С. 55–67.
4. *Зимин А. В.*, *Атаджанова О. А.*, *Романенков Д. А.*, *Козлов И. Е.*, *Шапрон Б.* Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 129–135.
5. *Коник А. А.*, *Козлов И. Е.*, *Зимин А. В.*, *Атаджанова О. А.* 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201.
6. *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.
7. *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 and SAR data // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125(7). e2019JC015832. DOI: 10.1002/2019JC015832.
8. *Fine E. C.*, *MacKinnon J. A.*, *Alford M. H.*, *Mickett J. B.* Microstructure observations of turbulent heat fluxes in a warm-core Canada Basin eddy // J. Physical Oceanography. 2018. V. 48. P. 2397–2418.
9. *Gade M.*, *Byfield V.*, *Ermakov S.*, *Lavrova O.*, *Mitnik L.* Slicks as indicators for marine processes // Oceanography. 2013. V. 26(2). P. 138–149.
10. *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(7). P. 3406–3414.
11. *Ikeda M.* Mesoscale eddy formation and evolution in the ice-covered ocean // Annals of Glaciology. 1991. V. 15. P. 139–147.
12. *Johannessen O. M.*, *Johannessen J. A.*, *Morrison J.*, *Farrelly B. A.*, *Svendsen E. A. S.* Oceanographic conditions in the marginal ice zone north of Svalbard in early Fall 1979 // J. Geophysical Research. 1983. V. 88(C5). P. 2755–2769.
13. *Johannessen J. A.*, *Johannessen O. M.*, *Svendsen E.*, *Shuchman R.*, *Manley T.*, *Campbell W. J.*, *Josberger E. G.*, *Sandven S.*, *Gascard J. C.*, *Olaussen T.*, *Davidson K.*, *Van Leer J.* Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // J. Geophysical Research: Oceans. 1987. V. 92(C7). P. 6754–6772.
14. *Johannessen J. A.*, *Shuchman R. A.*, *Digranes G.*, *Lyzenga D. R.*, *Wackerman C.*, *Johannessen O. M.*, *Vachon P. W.* Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar // J. Geophysical Research. 1996. V. 101(C3). P. 6651–6667. DOI: 10.1029/95JC02962.
15. *Karimova S. S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // Advances in Space Research. 2012. V. 50(8). P. 1107–1124.
16. *Karimova S.*, *Gade M.* Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37(10). P. 2394–2414. DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
17. *Kozlov I. E.*, *Kudryavtsev V. N.*, *Zubkova E. V.*, *Zimin A. V.*, *Chapron B.* Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite sar data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51. No. 9. P. 1073–1087. DOI: 10.1134/S0001433815090121.
18. *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(9). P. 6601–6616.
19. *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 p. DOI: 10.1117/12.2533317.

20. *Kozlov I. E.*, *Plotnikov E. V.*, *Manucharyan G. E.* Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics of marginal ice zone from sequential SAR observations // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 9. P. 2941–2947. DOI: 10.5194/tc-2020-126.
21. *Kudryavtsev V.*, *Kozlov I.*, *Chapron B.*, *Johannessen J. A.* Quad-polarization SAR features of ocean currents // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119(9). P. 6046–6065. DOI: 10.1002/2014JC010173.
22. *Mensa J. A.*, *Timmermans M.-L.*, *Kozlov I. E.*, *Williams W. J.*, *Özgökmen T.* Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 122(12). P. 9455–9475.
23. *Mityagina M. I.*, *Lavrova O. Y.*, *Karimova S. S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31(17–18). P. 4779–4790.
24. *Niebauer H. J.*, *Smith Jr. O. W.* A numerical model of mesoscale physical-biological interactions in the Fram Strait marginal ice zone // J. Geophysical Research: Oceans. 1989. V. 94(11). P. 16151–16175.
25. *Nurser A. J. G.*, *Bacon S.* The Rossby radius in the Arctic Ocean // Ocean Science. 2014. V. 10. P. 967–975.
26. *Stoffelen A.*, *Anderson D.* Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // J. Geophysical Research. 1997. V. 102(C3). P. 5767–5780. DOI: 10.1029/96JC02860.
27. *Von Appen W.-J.*, *Wekerle C.*, *Hehemann L.*, *Schourup-Kristensen V.*, *Konrad C.*, *Iversen M. H.* Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45(12). P. 6141–6149.
28. *Watanabe E.*, *Onodera J.*, *Harada N.*, *Honda M. C.*, *Kimoto K.*, *Kikuchi T.*, *Nishino S.*, *Matsuno K.*, *Yamaguchi A.*, *Ishida A.*, *Kishi M. J.* Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump // Nature Communications. 2014. V. 5. P. 3950.
29. *Wekerle C.*, *Wang Q.*, *Von Appe W.-J.*, *Danilov S.*, *Schourup-Kristensen V.*, *Jung T.* // Eddy-resolving simulation of the Atlantic water circulation in the Fram Strait with focus on the seasonal cycle // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122(11). P. 8385–8405.
30. *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(2). P. 253–266.

Properties of eddies near Svalbard and in Fram Strait from spaceborne SAR observations in summer

L. A. Petrenko, I. E. Kozlov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: larcpetr@gmail.com, igor.eko@gmail.com

Based on the analysis of spaceborne Envisat ASAR images in July – September 2007 surface signatures of open ocean eddies near Svalbard and in Fram Strait were identified. This allowed to identify about 3000 of eddy signatures, reveal the key regions of eddy formation, calculate their spatial probability, diameters and vorticity sign. As shown, most frequently eddies were observed in many fjords of Svalbard, to the west and northwest of it, in Stur-Fjord Strait, near Bear Island, and along the marginal ice zone in the Greenland Sea and Fram Strait. The cyclonic eddies clearly prevailed in the record, and most of them were found over the depth regions not exceeding 400 m. Eddy diameters varied from 0.5 to 65 km. Eddies with diameters of more than 10 km were found over deep regions, while those of 3–7 km dominated over the shelf. The spatial distribution of eddies clearly traces the main currents in the study region. Comparison of eddy sizes with the climatic values of the Rossby deformation radius in summer suggests that most of observed eddies belong to submesoscales.

Keywords: submesoscale eddies, Svalbard archipelago, Fram Strait, spaceborne SAR images, Arctic Ocean

Accepted: 18.09.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-167-177

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(1), pp. 203–210, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210.
2. Atadzhanova O. A., Kozlov I. E., Nablyudenie vikhrei v prolive Frama i vblizi arkhipelaga Shpitsbergen po dannym sputnikovykh RSA-izmerenii v zimnii period (Winter-time observations of eddies in Fram Strait and around Svalbard using spaceborne SAR data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17(7), pp. 182–190.
3. Zakharov V. G., Kononova N. K., Vzaimosvyaz' dinamiki polei dreifa l'da v arkticheskom basseine i tsirkulyatsii atmosfery severnogo polushariya (letnie sezony) (Relationship between the dynamics of ice drift fields in the Arctic basin and atmospheric circulation in the Northern hemisphere (summer seasons)), *Slozhnye sistemy*, 2013, No. 4(9), pp. 55–67.
4. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Chapron B., Submezomasshtabnye vikhri v Belom more po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh izmerenii (Submesoscale eddies in the White Sea based on satellite SAR Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 129–135.
5. Konik A. A., Kozlov I. E., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Sputnikovye nablyudeniya vikhrei i frontal'nykh zon Barentseva morya v gody s razlichnoi ledovitost'yu (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(5), pp. 191–201, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-191-201.
6. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Sea, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 2, pp. 75–83.
7. 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 and SAR data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, Vol. 125(7), e2019JC015832, DOI: 10.1002/2019JC015832.
8. Fine E. C., MacKinnon J. A., Alford M. H., Mickett J. B., Microstructure observations of turbulent heat fluxes in a warm-core Canada Basin eddy, *J. Physical Oceanography*, 2018, Vol. 48, pp. 2397–2418.
9. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L., Slicks as indicators for marine processes, *Oceanography*, 2013, Vol. 26(2), pp. 138–149.
10. 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(7), pp. 3406–3414.
11. Ikeda M., Mesoscale eddy formation and evolution in the ice-covered ocean, *Annals of Glaciology*, 1991, Vol. 15, pp. 139–147.
12. Johannessen O. M., Johannessen J. A., Morrison J., Farrelly B. A., Svendsen E. A. S., Oceanographic conditions in the marginal ice zone north of Svalbard in early Fall 1979, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88(C5), pp. 2755–2769.
13. Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., Shuchman R., Manley T., Campbell W. J., Josberger E. G., Sandven S., Gascard J. C., Olaussen T., Davidson K., Van Leer J., Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, Vol. 92(C7), pp. 6754–6772.
14. Johannessen J. A., Shuchman R. A., Digranes G., Lyzenga D. R., Wackerman C., Johannessen O. M., Vachon P. W., Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar, *J. Geophysical Research*, 1996, Vol. 101(C3), pp. 6651–6667, DOI: 10.1029/95JC02962.
15. 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(8), pp. 1107–1124.
16. Karimova S., Gade M. Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37(10), pp. 2394–2414, DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
17. Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B., Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite sar data, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51(9), pp. 1073–1087, DOI: 10.1134/S0001433815090121.
18. 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(9), pp. 6601–6616.
19. 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., DOI: 10.1117/12.2533317.
20. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E., Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics of marginal ice zone from sequential SAR observations, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14(9), pp. 2941–2947, DOI: 10.5194/tc-2020-126.

21. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J. A., Quad-polarization SAR features of ocean currents, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119(9), pp. 6046–6065, DOI: 10.1002/2014JC010173.
22. Mensa J. A., Timmermans M.-L., Kozlov I. E., Williams W. J., Özgökmen T., Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics, *J. Geophysical Research*: Oceans, 2018, Vol. 122(12), pp. 9455–9475.
23. Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S., Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31(17–18), pp. 4779–4790.
24. Niebauer H. J., Smith Jr. O. W., A numerical model of mesoscale physical-biological interactions in the Fram Strait marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1989, Vol. 94(11), pp. 16151–16175.
25. Nurser A. J. G., Bacon S., The Rossby radius in the Arctic Ocean, *Ocean Science*, 2014, Vol. 10, pp. 967–975.
26. Stoffelen A., Anderson D., Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102(C3), pp. 5767–5780, DOI: 10.1029/96JC02860.
27. Von Appen W.-J., Wekerle C., Hehemann L., Schourup-Kristensen V., Konrad C., Iversen M. H., Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45(12), pp. 6141–6149.
28. Watanabe E., Onodera J., Harada N., Honda M. C., Kimoto K., Kikuchi T., Nishino S., Matsuno K., Yamaguchi A., Ishida A., Kishi M. J., Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump, *Nature Communication*, 2014, Vol. 5, p. 3950.
29. Wekerle C., Wang Q., Von Appen W.-J., Danilov S., Schourup-Kristensen V., Jung T., Eddy-resolving simulation of the Atlantic water circulation in the Fram Strait with focus on the seasonal cycle, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122(11), pp. 8385–8405.
30. 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(2), pp. 253–266.