

Наблюдение вихрей в проливе Фрама и вблизи архипелага Шпицберген по данным спутниковых РСА-измерений в зимний период

О. А. Атаджанова¹, И. Е. Козлов²

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*
E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

В настоящей работе на основе обработки спутниковых данных Envisat ASAR для района пр. Фрама и вблизи арх. Шпицберген проанализированы особенности распространения поверхностных проявлений вихрей (ППВ) и их пространственно-временные характеристики в зимний период 2006/2007 гг. В этот период года в спутниковых данных регистрируются преимущественно вихри прикромочной зоны (94 % от общего числа), поверхностные проявления которых формируются за счёт горизонтального перераспределения разреженного льда. Более высокая скорость приводного ветра в зимний период по сравнению с летом ограничивает идентификацию вихрей на участках открытой воды. Среди выделенных ППВ, имеющих диаметр от 1 до 67 км, преобладают вихри циклонического типа. Свыше 60 % вихрей имеют диаметр менее 10 км и регистрируются на шельфе. Более крупные вихри диаметром >20 км наблюдаются вдоль прикромочной зоны над глубинами >1000 м. Районы высокой повторяемости ППВ приходятся на области прикромочной зоны в западной части пр. Фрама, вблизи о. Надежды, пр. Стур-Фьорд и севернее о. Медвежий. Сравнение полученных результатов с аналогичными за летний сезон показывает частичное совпадение районов регистрации вихрей, а также схожую статистику о размерах вихрей прикромочной зоны в других арктических районах.

Ключевые слова: океанские вихри, прикромочная ледовая зона, субмезомасштаб, Северный Ледовитый океан, пролив Фрама, архипелаг Шпицберген, лёд, спутниковые РСА-изображения

Одобрена к печати: 15.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-178-186

Введение

Активный интерес к исследованию вихревых структур в приповерхностном слое океана возник несколько десятилетий назад ввиду их существенного влияния на поля гидрофизических характеристик, а также их роли в вертикальном и горизонтальном перемешивании (Зацепин и др., 2011; Федоров, Гинзбург, 1988; Thomas et al., 2008).

При этом именно использование спутниковой информации среднего и высокого разрешения позволило получить детальные сведения о распространении и поверхностных характеристиках вихревых структур разного масштаба в различных районах Мирового океана (Гинзбург, 1992; DiGiacomo, Holt, 2001; Karimova, 2012; Mityagina et al., 2010; Zatsepin et al., 2019). В последнее время исследование характеристик вихрей в тёплый период года на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) получило своё развитие также и в арктическом регионе (Артамонова и др., 2020; Зимин и др., 2016; Atadzhanova, Zimin, 2019; Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2019a; Mensa et al., 2018), в том числе и в пр. Фрама (Петренко, Козлов, 2020; Bashmachnikov et al., 2020; Kozlov et al., 2020).

Пролив Фрама и акватория вблизи арх. Шпицберген представляют особый интерес в плане исследования вихревых структур. В этом районе происходит взаимодействие атлантических и арктических вод, распространяющихся в виде Западно-Шпицбергенского (далее — ЗШ) и Восточно-Гренландского течений соответственно (*рис. 1*, см. с. 179). Результаты недавних исследований показывают, что возникающие в этом районе вихри играют важную роль в рециркуляции атлантических вод и горизонтальном транспорте тепла, что, в свою очередь, влияет на тепловой баланс Северного Ледовитого океана (Hattermann et al., 2016; Wekerle et al., 2017).

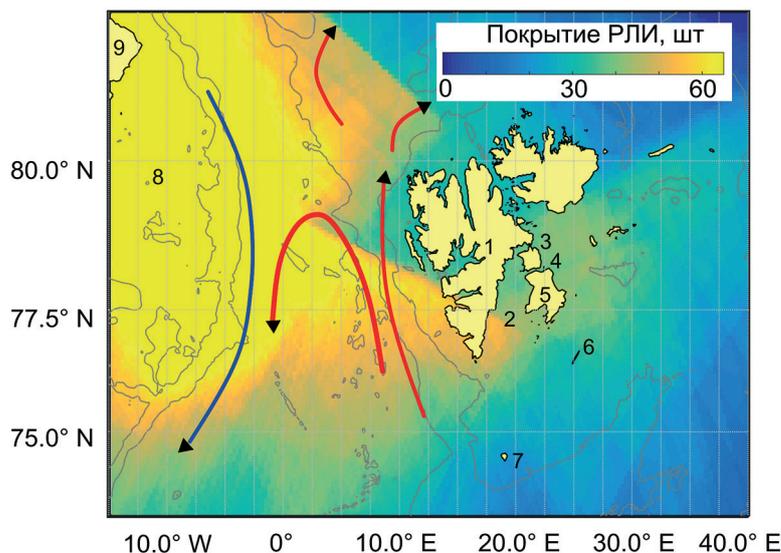


Рис. 1. Покрытие района исследований РЛ-съёмкой Envisat ASAR в зимний период с декабря 2006 г. по март 2007 г. Красными стрелками обозначено положение Западно-Шпицбергенского течения и его ветвей, синей — положение Восточно-Гренландского течения. 1 — арх. Шпицберген; 2 — пр. Стур-Фьорд; 3 — пр. Хелейсунн; 4 — пр. Фримен; 5 — о. Эдж; 6 — о. Надежды; 7 — о. Медвежий; 8 — Гренландский шельф; 9 — о. Гренландия. Серыми линиями отмечены изобаты 300 и 2000 м

В работе (Wekerle et al., 2017) на основе анализа результатов региональной вихреразрешающей модели показано, что в зимний период происходит интенсификация ЗШ-течения. В результате этого за счёт бароклинной неустойчивости основной струи пограничного течения наблюдается более интенсивная по сравнению с летом генерация вихрей. Последнее, согласно работам (Hattermann et al., 2016; Wekerle et al., 2017), приводит к более интенсивной рециркуляции атлантических вод в проливе.

Насколько известно авторам, анализ вихревой активности в указанном районе в зимний период по данным спутниковых наблюдений до настоящего времени не проводился. Цель настоящего исследования состоит в заполнении указанного пробела и получении сведений об основных пространственно-временных характеристиках вихревых структур в данном районе на основе анализа спутниковой радиолокационной информации.

Данные и методы

В настоящей работе для района пр. Фрама и окрестностей арх. Шпицберген выполнен анализ 212 спутниковых РЛИ за зимний период 2006/2007 гг. (декабрь 2006 г. — 13 РЛИ, январь 2007 г. — 69 РЛИ, февраль 2007 г. — 52 РЛИ, март 2007 г. — 78 РЛИ). Спутниковые данные были получены радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) Envisat (*англ.* Environmental Satellite) ASAR (*англ.* Advanced Synthetic Aperture Radar) в С-диапазоне и режиме съёмки Wide Swath Mode с шириной полосы обзора 400×400 км и пространственным разрешением 150×150 м. Как видно из карты покрытия РЛ-съёмкой района исследований (см. рис. 1), наибольшее количество изображений (более 60 РЛИ) приходится на западную часть пр. Фрама, где проходит ледовая кромка. На районы в окрестности арх. Шпицберген приходится от 30 (севернее и северо-восточнее) до 60 РЛИ (к югу и юго-западу от архипелага).

В качестве параметров поверхностных проявлений вихрей (ППВ) на РЛИ регистрировались координаты центра вихря, его диаметр, знак вращения вихря (циклонический — Сп, антициклонический — Ас), механизм проявления (плёночный, сдвигово-волновой или ледовый) и глубина места, соответствующая координатам центра вихря, на основе методики, представленной в работе (Kozlov et al., 2019a).

Полученные результаты

В результате анализа спутниковых данных было зарегистрировано 424 ППВ с диаметром от 1 до 68 км. Пространственное распределение всех выделенных вихревых структур показано на *рис. 2а*. Как видно, проявления вихрей регистрировались преимущественно вдоль ледовой кромки в пр. Фрама и к юго-востоку от арх. Шпицберген. При этом к северу от архипелага вихри практически не регистрировались. Поле повторяемости вихрей, рассчитанное в виде отношения числа вихрей в ячейке сетки размером 25×25 км к количеству радиолокационных изображений этой ячейки (*рис. 2б*), отчётливо демонстрирует, что наиболее часто вихри регистрировались в пр. Стур-Фьорд, а также вблизи островов Надежды и Медвежий. Частая регистрация проявлений вихрей в пр. Стур-Фьорд может быть обусловлена взаимодействием холодных арктических вод, которые поступают через проливы Хелейсунн и Фримен, и тёплых атлантических вод, поступающих с юга вдоль западного берега о. Эдж.

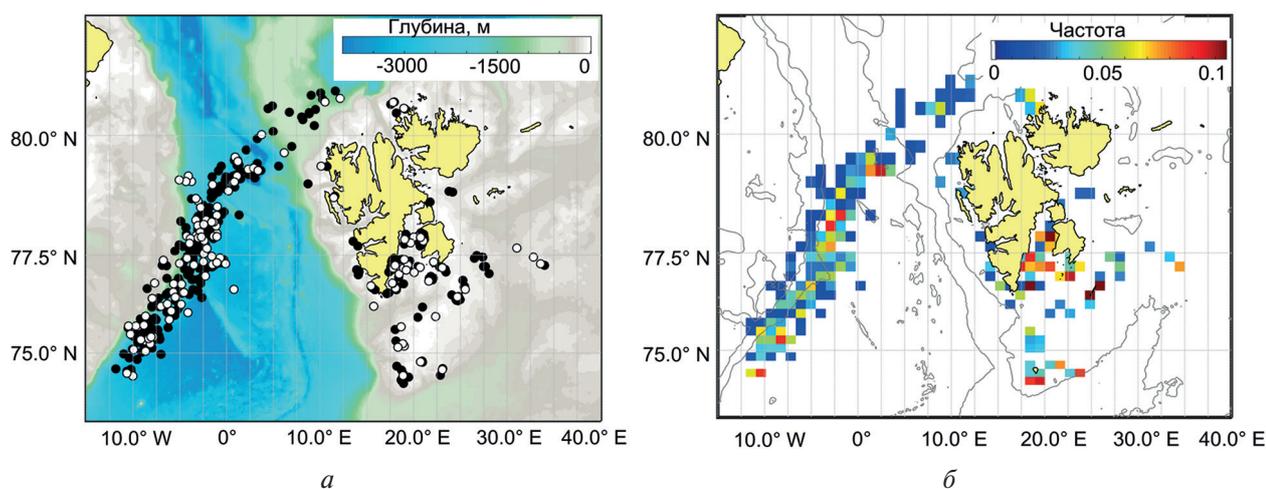


Рис. 2. Пространственное распределение вихревых структур в пр. Фрама с декабря 2006 г. по март 2007 г.: *а* — местоположение вихрей; *б* — повторяемость проявлений вихрей в спутниковых РЛИ. Чёрными маркерами показаны циклонические вихри, белыми — антициклонические. Серыми линиями на *рис. 2б* отмечены изобаты 300 и 2000 м

Кроме того, районы с высокой повторяемостью вихрей наблюдаются также на отдельных участках прикромочной зоны льда, простирающейся над глубоководными районами на северо-востоке пр. Фрама и до границ континентального склона северной части Гренландского моря на юго-западе.

Важно отметить, что в отличие от спутниковых наблюдений за летний период для морей Чукотского и Бофорта (Артамонова и др., 2020), где количество вихрей открытой воды и прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) было примерно одинаковым, почти все проявления вихрей (94 %) в исследуемом районе в зимний период наблюдались внутри ПЛЗ. Согласно работам (Johannessen et al., 1987; Smith et al., 1984; Wadhams, Squire, 1983), основными механизмами генерации вихрей в прикромочной зоне пр. Фрама выступают: 1) баротропная или бароклинная неустойчивость струи прикромочного течения на периферии Восточно-Гренландского течения на фоне переменного ветра; 2) топографическая генерация вихрей над глубоководными впадинами и возвышениями; 3) взаимодействие ледовой кромки с вихрями, отрывающимися от струи тёплого Западно-Шпицбергенского течения и рециркулирующими на запад; 4) генерация вихрей на распреснённом прикромочном фронте под влиянием неоднородной экмановской накачки вдоль меандрирующей ледовой кромки или их комбинация.

Лишь небольшая часть вихрей наблюдалась на участках открытой воды за счёт плёночного или сдвиго-волнового механизмов. Столь малое их число, по-видимому, обусловлено

более интенсивными ветровыми условиями в районе исследований в зимний период, при которых РЛ-контрасты поверхностных проявлений вихрей малы или отсутствуют (Karimova, 2012; Karimova, Gade, 2016). Согласно данным NCEP/NCAR (NCEP — *англ.* National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов США; NCAR — *англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США), за зимний период 2007 г. средняя скорость ветра над районом исследований составила 8–9 м/с, достигая 10 м/с в его западной и юго-западной частях. Для сравнения, в летний период скорость ветра составляла около 3–5 м/с.

Отметим некоторые особенности пространственно-временной изменчивости характеристик вихрей. В течение зимнего сезона меньше всего проявлений было зарегистрировано в декабре, когда обеспеченность РЛ-данными была минимальной. Максимум наблюдений вихрей (40 %) приходится на март, далее следует февраль (~30 %), хотя в этом месяце снимков было меньше, чем в январе.

В целом среди зарегистрированных ППВ около 70 % проявлений относятся к циклонам, причём их количество существенно преобладает над антициклонами и в каждый отдельный месяц. Диаметр антициклонических вихрей в среднем за весь период и за отдельные месяцы был выше (13,2 км), чем у циклонов (10,1 км) (*таблица*).

Распределение характеристик вихревых структур по месяцам

Месяц	Количество			Средний диаметр, км		
	Сп	Ас	Все	Сп	Ас	Все
Декабрь 2006 г.	32	8	40	11,1	12	11,3
Январь 2007 г.	60	15	75	8,2	10,2	8,6
Февраль 2007 г.	89	44	133	11,6	14,2	12,5
Март 2007 г.	114	62	176	9,6	13,3	10,9
Всего	295	129	424	10,1	13,2	11

Пространственное распределение средних диаметров вихрей в зимний период на сетке с размером ячейки 25×25 км представлено на *рис. 3а*. Как видно из рисунка, в шельфовой зоне арх. Шпицберген чаще всего регистрировались вихри диаметром до 5–8 км. В пр. Фрама вдоль кромки льда встречались вихри разных размеров: как небольшие (10–15 км), так и более крупные (свыше 20–30 км).

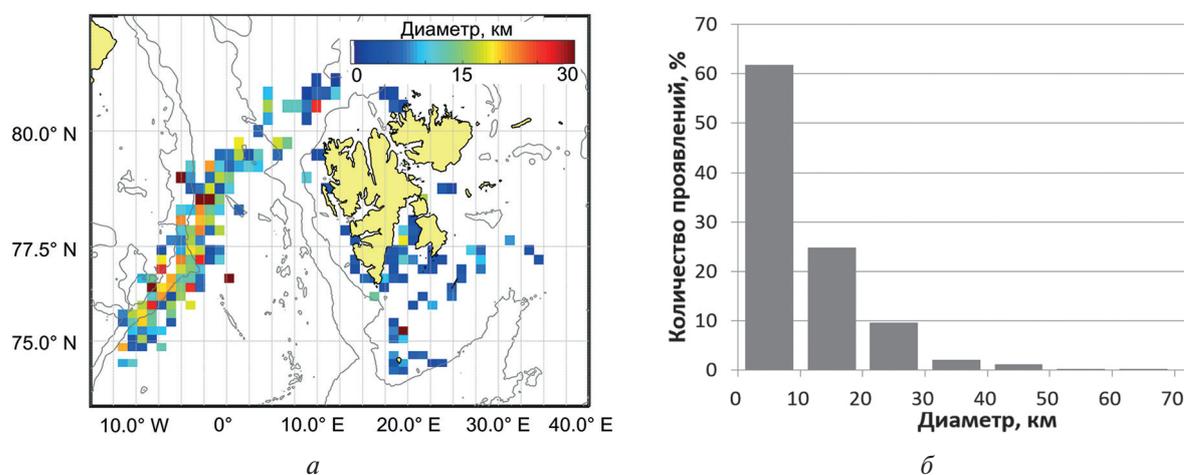


Рис. 3. Диаметры наблюдаемых вихревых проявлений: *а* — пространственное распределение средних диаметров вихрей на сетке с размером ячейки 25×25 км; *б* — гистограмма распределения диаметров вихрей. Серыми линиями на *рис. 3а* показаны изобаты 300 и 2000 м

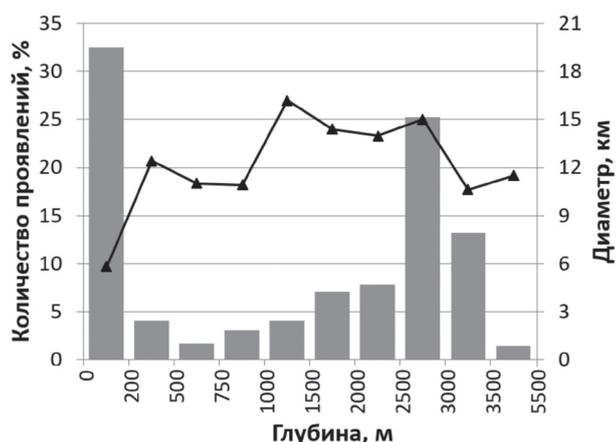


Рис. 4. Гистограмма распределения количества проявлений вихрей (серые столбцы) и их среднего диаметра (чёрная кривая) в зависимости от глубины места

диаметром свыше 40 км отмечались в центральной части прикромочной зоны пр. Фрама, а также севернее о. Медвежий.

На рис. 4 показана гистограмма распределения количества вихрей и их средних диаметров в зависимости от глубины места, над которым регистрировались проявления вихрей. Как видно из рисунка, наибольшее количество вихрей (33 %) приходится на шельфовые районы с глубинами до 200 м вблизи арх. Шпицберген и в Гренландском море. Среднее значение диаметра вихрей для этих глубин становится наименьшим и составляет 5,8 км. Важно отметить, что уже на следующем интервале глубин 200–500 м среднее значение диаметра вихрей увеличивается в два раза, и далее эта существенная разница сохраняется на всех прочих интервалах глубин. Второй пик по числу проявлений приходится на глубины от 2500 до 3000 м, где зарегистрирована четверть всех вихрей со средним диаметром 15 км. Меньше всего вихрей регистрировалось над глубинами 500–750 м и свыше 3500 м.

Обсуждение результатов и выводы

В настоящей работе выполнен анализ пространственно-временной изменчивости характеристик вихрей в районе пр. Фрама и вблизи арх. Шпицберген в зимний период. В этот период года в спутниковых РСА-данных регистрируются преимущественно вихри прикромочной зоны, поверхностные проявления которых формируются за счёт горизонтального перераспределения мелкобитого льда и одиночных льдин. Более высокая средняя скорость приводного ветра в зимний период по сравнению с летом ограничивает идентификацию вихрей на участках открытой воды, в то время как вихри прикромочной зоны отчётливо регистрируются даже при более высоких ветрах. В силу указанных ограничений результаты спутниковых наблюдений не позволяют судить об изменениях интенсивности вихреобразования в районе исследований, о которых известно из результатов численного моделирования (Hattermann et al., 2016; Wekerle et al., 2017).

Сравнение полученных результатов с результатами РСА-наблюдений в пр. Фрама за летний период 2007 г. (Петренко, Козлов, 2020; Kozlov et al., 2019b) показывает, что районы регистрации вихрей в летний и зимний периоды частично совпадают. При этом в зимний период в прикромочной зоне чаще регистрируются крупные вихри диаметром более 20 км. Схожая статистика о размерах вихрей прикромочной зоны была получена ранее для акватории морей Чукотского и Бофорта за летний период (Артамонова и др., 2020; Kozlov et al., 2019a), исходя из чего можно заключить, что пространственные характеристики вихрей ПЛЗ схожи для указанных районов и мало зависят от сезона. Важно отметить, что доминирование циклонических вихрей над антициклонами также оказывается общей чертой для большинства ранее исследованных районов Арктики, включая области открытой воды и ПЛЗ (Артамонова и др., 2020; Зимин и др., 2016; Петренко, Козлов, 2020; Atadzhanova et al., 2017, 2018; Kozlov et al., 2019a, b).

В то же время результаты недавних наблюдений в прикромочной зоне пр. Фрама в сентябре 2017 г. описывают формирование крупных вихрей с диаметром около 80–90 км и величиной орбитальной скорости, достигающей 60–70 см/с (Козлов, Плотников, 2020; Kozlov et al., 2020). Определение причин формирования таких аномально крупных вихрей в прикромочной зоне остаётся открытым вопросом и задачей будущих исследований.

Анализ характеристик вихревых структур проводился при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-20078 мол_а_вед). Скачивание и обработка радиолокационных изображений выполнена в рамках государственного задания по теме № 0149-2019-0015 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натуральных экспериментальных работ».

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. Гинзбург А. И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология. 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997–1004.
3. Зацепин А. Г., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Островский А. Г., Соловьев Д. М. Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
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. Козлов И. Е., Плотников Е. В. Динамика вихрей в Арктике по данным квазисинхронных спутниковых РСА измерений Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 178–186.
6. Петренко Л. А., Козлов И. Е. Характеристики вихрей у архипелага Шпицберген и в проливе Фрама по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 7. С. 171–181.
7. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л: Гидрометеиздат, 1988. 303 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. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Svergun E. I., Konik A. A. Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea // Physical Oceanography. 2018. V. 25. No. 3. P. 220–228.
11. Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., Glok 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. 5. Art. No. e2019JC015832. 26 p.
12. DiGiacomo P. M., Holt B. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. No. C10. P. 22521–22543.
13. 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.
14. 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. No. C7. P. 6754–6772.
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. Iss. 10. P. 2394–2414.
17. 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.

18. 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.
19. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. P. 2941–2947. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.
20. 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.
21. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Karimova S. S. Multi-sensor study of eddy and internal wave dynamics in the north-eastern Black Sea coastal waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. No. 17. P. 4779–4790.
22. Smith D. C., Morison J., Johannessen J. A., Untersteiner N. Topographic generation of an eddy at the ice edge of the East Greenland current // *J. Geophysical Research*. 1984. V. 89. P. 8205–8208.
23. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime. Geophysical Monograph Ser.* 2008. V. 177. P. 17–38.
24. Wadhams P., Squire V. A. An ice-water vortex at the Edge of East Greenland current // *J. Geophysical Research*. 1983. V. 88. P. 2770–2780.
25. 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. V. 122(11). P. 8385–8405.
26. 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. No. 2. P. 253–266.

Winter-time observations of eddies in Fram Strait and around Svalbard using spaceborne SAR data

O. A. Atadzhanova¹, I. E. Kozlov²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

In this work we analyze the spatial distribution of surface eddy signatures and their spatio-temporal properties in Fram Strait and around Svalbard in winter season of 2006–2007 using spaceborne Envisat ASAR data. During the winter season, eddies are primarily detected within the marginal ice zone (MIZ) (94 % out of total eddy number), where their surface signatures are formed due to horizontal redistribution of low concentration ice fields. Compared to summer season, higher near-surface winds during winter preclude the observations of eddies over open ocean regions. As shown, the observed eddy diameters range between 1 km and 67 km, and cyclonic eddies clearly dominate in the record. More than 60 % of all eddies have diameter values below 10 km and are registered over the shelf. Larger eddies with diameter values above 20 km are found in the MIZ over depths exceeding 1000 m. Regions of high eddy probability are found over MIZ regions in the western Fram Strait, near Hopen Island, in Storfjorden and north of Bear Island. Comparison with the recent results of summer-time SAR observations over the study region shows that key regions of eddy activity partly overlap, while the horizontal scales of MIZ eddies observed in Fram Strait are similar to those identified over other Arctic regions.

Keywords: ocean eddies, marginal ice zone, submesoscales, Arctic Ocean, Fram Strait, Svalbard, sea ice, spaceborne SAR images

Accepted: 15.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-178-186

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. Ginzburg A. I., Nestatsionarnye vikhreyye dvizheniya v okeane (Non-stationary vortical motions in the ocean), *Okeanologiya*, 1992, Vol. 32, Issue 6, pp. 997–1004.
3. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Ostrovskii A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Soloviev D. M., Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 554–567.
4. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Shapron 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. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Dinamika vikhrei v Arktike po dannym kvazisinkhronnykh sputnikovykh RSA izmerenii Sentinel-1 (Dynamics of eddies in the Arctic according to Sentinel-1 quasi-synchronous satellite SAR data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 178–186.
6. Petrenko L. A., Kozlov I. E., Kharakteristiki vikhrei u arhipelaga Shpitsbergen i v prolive Frama po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh nablyudenii v letnii period (Properties of eddies near Svalbard and in Fram Strait from spaceborne SAR observations in summer), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 7, pp. 171–181.
7. Fedorov K. N., Ginzburg A. I., *The Near-surface Layer of the Ocean*, Netherlands: VSP, 1992, 257 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. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Svergun E. I., Konik A. A., Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea, *Physical Oceanography*, 2018, Vol. 25, No. 3, pp. 220–228.
11. Bashmachnikov I. L., Kozlov I. E., Petrenko L. A., Glok 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 5, Art. No. e2019JC015832, 26 p.
12. DiGiacomo P. M., Holt B., Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, No. C10, pp. 22521–22543.
13. 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.
14. 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, No. C7, pp. 6754–6772.
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, Issue 10, pp. 2394–2414.
17. 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.
18. 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.
19. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E., Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, pp. 2941–2947, available at: <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.
20. 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.
21. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Karimova S. S., Multi-sensor study of eddy and internal wave dynamics in the north-eastern Black Sea coastal waters, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 17, pp. 4779–4790.
22. Smith D. C., Morison J., Johannessen J. A., Untersteiner N., Topographic generation of an eddy at the ice edge of the East Greenland current, *J. Geophysical Research*, 1984, Vol. 89, pp. 8205–8208.

23. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A., Submesoscale processes and dynamics, *Ocean Modeling in an Eddying Regime, Geophysical Monograph Ser.*, 2008, Vol. 177, pp. 17–38.
24. Wadhams P., Squire V.A., An ice-water vortex at the Edge of East Greenland current, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, pp. 2770–2780.
25. 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.
26. 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, No. 2, pp. 253–266.