

## Особенности поверхностных проявлений малых вихрей в Беринговом море в летний сезон по данным спутниковых радиолокационных изображений

О. А. Атаджанова<sup>1,2</sup>, А. В. Зимин<sup>1,3</sup>, К. А. Круглова<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

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

<sup>3</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет*  
*Санкт-Петербург, 199034, Россия*

<sup>4</sup> *Российский государственный гидрометеорологический университет*  
*Санкт-Петербург, 192007, Россия*

Представлены результаты наблюдения малых вихревых (субмезомасштабных) структур в Беринговом море, полученные на основе обработки радиолокационных изображений со спутников Sentinel-1A/B, за период с июня по август 2020 г. Анализ 704 снимков позволил идентифицировать 1018 случаев поверхностных проявлений вихрей. Были детектированы проявления разнообразных форм: одиночные, дипольные, грибовидные, цепочки вихрей. На основе статистического анализа были выявлены районы их частой встречаемости и оценены геометрические характеристики выделенных структур, а также особенности их проявлений. Большая часть вихрей была детектирована в северной мелководной части моря. Установлено, что в подавляющем большинстве случаев регистрировались вихри циклонического типа вращения. Показано, что средний за сезон диаметр структур был одинаков для циклонических и антициклонических вихрей и составил 2,5 км, что соответствует средним за летний сезон оценкам бароклинного радиуса Россби для мелководного района. Более 85 % случаев наблюдения вихрей приходится на август, а наименьшее (менее 5 %) количество — на июнь. Установлено, что при скоростях ветра 4 м/с и более вихревые структуры в Беринговом море регистрируются крайне редко.

**Ключевые слова:** субмезомасштаб, радиолокационные изображения, малые вихри, Берингово море, Sentinel-1, Берингов пролив

Одобрена к печати: 09.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278

### Введение

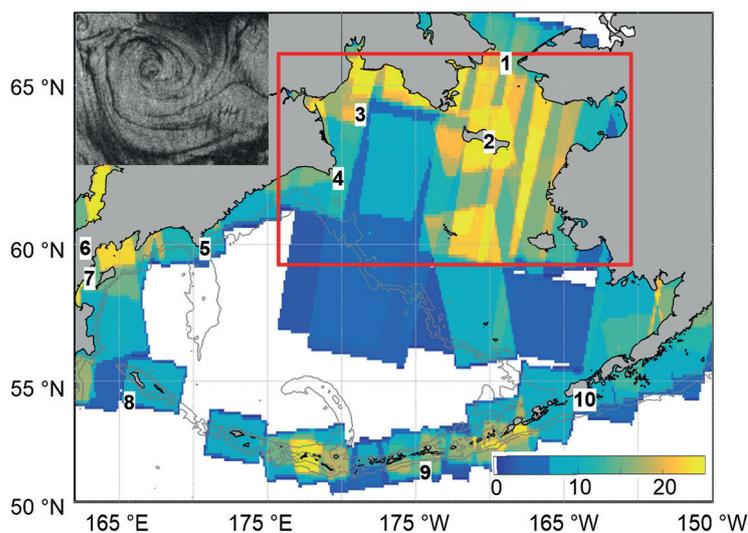
Ещё в середине прошлого века по данным контактных измерений, выполненных в северных районах Берингова моря, было установлено наличие в поверхностном слое структур с масштабами от 3 до 14 км, которые по характеристикам отличаются от окружающих вод. При обобщении наблюдений была выдвинута гипотеза, что «именно эти образования являются основной особенностью верхнего слоя» (Коучмен, 1979).

В дальнейшем с помощью анализа спутниковых наблюдений был выявлен широкий характер распространения сходных по масштабам структур — малых (спиральных) вихрей в Мировом океане (Гинзбург, 1992). По принятой в настоящее время классификации (Thomas et al., 2008) вихри с масштабами от сотен метров до десятка километров относят к категории «субмезомасштабных» структур. Субмезомасштабные вихри в районах частой встречаемости значительно влияют на турбулентный обмен (Зимин, 2018), баланс сил плавучести (Кубряков и др., 2021) и, соответственно, на перераспределение биогенных элементов, что принципиально для экосистем (Belevich et al., 2016), а значит, и добычи биоресурсов (Lévy et al., 2018). Исследование субмезомасштабных вихрей последние годы активно ведётся с использованием спутниковых радиолокаторов синтезированной апертуры в различных районах Мирового океана (Каримова, 2012; Atadzhanova, Zimin, 2019; Kozlov, Atadzhanova, 2022; Kozlov et al., 2019; Mensa et al., 2018; Zimin et al., 2021).

Важно отметить, что для определения верхней границы субмезомасштаба на конкретной акватории надо знать оценки бароклинного радиуса Россби, который зависит от широты, стратификации плотности и глубины. В топографии Берингова моря чётко выделяется мелководная и глубоководная части по линии примерно от м. Наварин до о. Унимак. Согласно работе (Parker-Stetter et al., 2016), в мелководном районе радиус Россби составляет от 0,8 до 20 км. В глубоководной части он немногим больше 20 км (Белоненко, Новоселова, 2019). Однако статистически обоснованные сведения об изменчивости характеристик вихрей размерами от нескольких сотен метров до двух десятков километров на акватории моря до сих пор отсутствуют. Единственной работой, в которой на основании спутниковой радиолокации выявлены поверхностные проявления вихревых дорожек в Беринговом море, представляется исследование (Lavrova et al., 2003), где было показано, что видимые на снимках вихревые следы от обтекания островов и мысов имеют размеры порядка десятка километров. Это определило цель данной работы — анализ встречаемости и оценка характеристик малых (субмезомасштабных) вихрей на акватории Берингова моря по данным радиолокационных изображений (РЛИ) на примере летнего сезона 2020 г.

### Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались высокоразрешающие изображения Sentinel-1A/B, полученные в режимах съёмки IW (*англ.* Interferometric Wide — интерферометрический широкозахватный) и EW (*англ.* ExtraWide — сверх-широкозахватный) и с разрешением 20 и 90 м соответственно за период с 1 июня по 31 августа 2020 г. (за июнь — 216 шт., за июль — 206 шт., за август — 282 шт.). Карта покрытия РЛИ исследуемых акваторий представлена на *рис. 1*, где видно, что покрытие крайне неравномерно. Снимки охватывают преимущественно прибрежные районы как континентов, так и островов. Среднее покрытие по всей акватории составило около 6 РЛИ за период. В целом покрытие выше в мелководной зоне моря. Поэтому те районы, где покрытие РЛИ были меньше среднего, считались малообеспеченными по покрытию РЛИ и не использовались при построении пространственных карт частоты регистрации и осреднённых диаметров на единицу сетки размером  $0,4 \times 0,9^\circ$  по широте и долготе. Площадь одной ячейки составляла около 2,2 тыс. км<sup>2</sup>.



*Рис. 1.* Покрытие радиолокационными изображениями Берингова моря летом 2020 г. (шкала представлена в количестве РЛИ), где цифрами обозначены: 1 — Берингов пролив, 2 — о. Св. Лаврентия, 3 — Анадырский зал., 4 — м. Наварин, 5 — м. Олюторский, 6 — Камчатский п-ов, 7 — Карагинский зал., 8 — Алеутские о-ва, 9 — Командорские о-ва, 10 — о. Унимак. Красным прямоугольником выделена северная часть моря; серые линии — изобаты 300 и 2000 м. На врезке представлен фрагмент РЛИ Sentinel-1 от 18.08.2020, полученный в северной части моря

За поверхностное проявление вихрей (ППВ) на радиолокационных изображениях принято считать структуры, образованные тонкими закрученными в спирали или дуги тёмными или, наоборот, яркими светлыми полосами на морской поверхности. Существует несколько механизмов проявления вихревых структур: плёночный, ледовый и сдвигово-волновой (Каримова, 2010). В данной работе регистрировались вихри преимущественно плёночного механизма (пример на *рис. 1б*), когда происходит «прорисовка» вихревых структур в результате подавления капиллярно-гравитационных волн поверхностными плёнками естественного происхождения, при этом в результате конвергенции поверхности воды образуются нитевидные слики, которые закручиваются в спираль. Вихри, регистрируемые за счёт сдвигово-волнового механизма, отмечались гораздо реже, проявления за счёт ледового механизма не отмечались на РЛИ.

Методика исследования аналогична той, что использовалась авторами для исследований в других морях (Atadzhanova, Zimin, 2019). На РЛИ визуально определялись вихревые (закрученные в спирали) структуры с помощью вписывания этих структур в эллипс. Определялись следующие характеристики вихревых структур: координаты центра, диаметр и тип вращения (циклонические, антициклонические). Спираль, закрученная против часовой стрелки, принималась за проявление вихря с циклоническим типом вращения ( $C_n$  — cyclone), а закрученная по часовой стрелке — с антициклоническим ( $A_c$  — anticyclone). Для анализа РЛИ использовалось программное обеспечение ESA SNAP и MATLAB.

Для выявления причин изменчивости проявлений вихревых структур дополнительно привлекались шестичасовые данные о характеристиках приводного ветра, которые усреднялись до суток. Данные были получены из продукта IFREMER CERSAT WIND\_GLO\_WIND\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_012\_006 (<https://marine.copernicus.eu>) с шагом  $0,25 \times 0,25^\circ$  по широте и долготе для каждого синоптического периода (00:00, 06:00, 12:00, 18:00). В продукте для расчёта шестичасовых полей ветра используются данные спутникового зондирования, полученные от существующих скаттерометров и радиометров, в сочетании с информацией реанализа ERA Interim.

## Полученные результаты

Всего за летний период было зарегистрировано 1018 поверхностных проявлений вихревых структур обоих типов вращения. Пространственное распределение центров ППВ с учётом знака вращения представлено на *рис. 2а* (см. с. 273). Около четырёх пятых проявлений вихрей зафиксированы в северной мелководной части моря. Остальные ППВ сосредоточены в области шельфа Камчатского п-ова, Алеутских и Командорских островов. Только единичные вихревые структуры регистрировались в глубоководных районах. При общем преобладании на акватории циклонических вихрей не выделялись области, где отмечались бы вихри только одного типа вращения.

Для выявления районов частой встречаемости ППВ была рассчитана частота регистрации этих проявлений на радиолокационных изображениях, представленная на *рис. 2б*. Чаще всего вихри регистрировались в районе восточнее входа в Анадырский залив (отмечен овалом на *рис. 2б*). При покрытии 15–20 РЛИ частота составила 1,5; это значит, что минимум 1,5 вихря встречалось на каждом снимке, охватывающим данный район. Отмечались скопления вихрей как в виде цепочек и одиночных структур, так и диполей. Подобные проявления характерны для районов, где наблюдается локальный сдвиг течений, например, под воздействием разнонаправленных потоков. В Беринговом проливе и вблизи о. Св. Лаврентия частота варьируется в пределах единицы; это означает, что на каждом РЛИ, покрывающем единицу сетки, встречался минимум 1 вихрь. Здесь также встречались одиночные вихри, цепочки вихрей и грибовидные структуры. При этом в дипольных структурах вихри с антициклоническим типом вращения проявлялись крайне слабо. На акватории Карагинского залива частота была в пределах 0,7; здесь преобладали структуры, связанные с неоднородностями береговой линии. Ещё реже ППВ фиксировались в области Алеутских о-вов, где в восточной части гряды максимальная частота встречаемости достигала 0,5, при этом встречались структуры также различных типов.

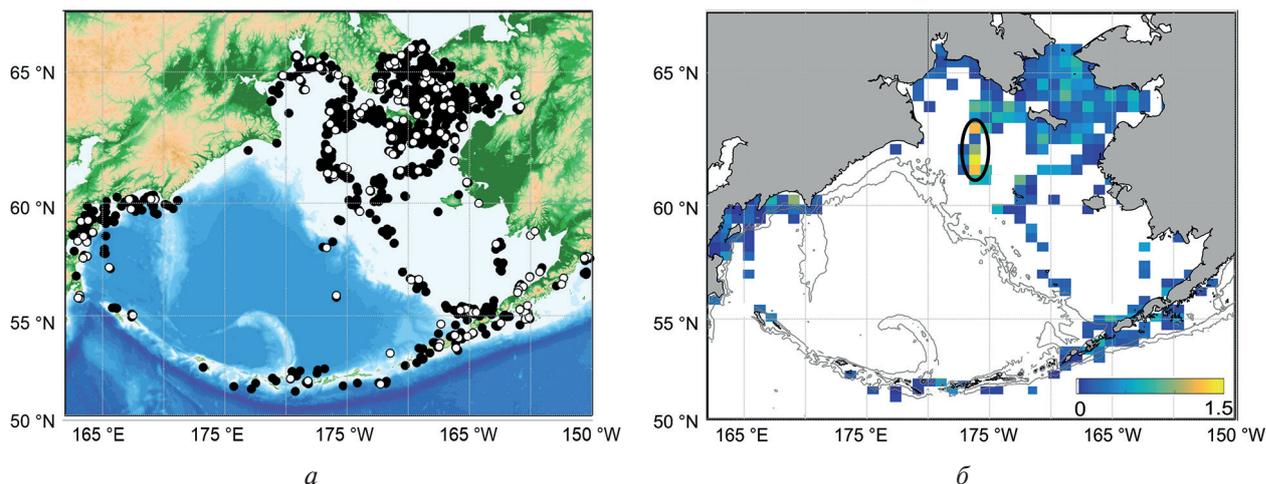


Рис. 2. Пространственное распределение центров вихрей (а) и частоты регистрации поверхностных проявлений вихрей на единицу сетки (б) за лето 2020 г. (шкала на карте (б) представлена в усл. ед.). На карте (а) чёрные круги — вихри циклонического типа вращения, белые — антициклонического. На карте (б) серым цветом отмечены изобаты 300 и 2000 м, чёрным овалом выделена область частой регистрации вихрей. Ячейки сетки, где покрытие РЛИ было меньше среднего, закрашены белым цветом

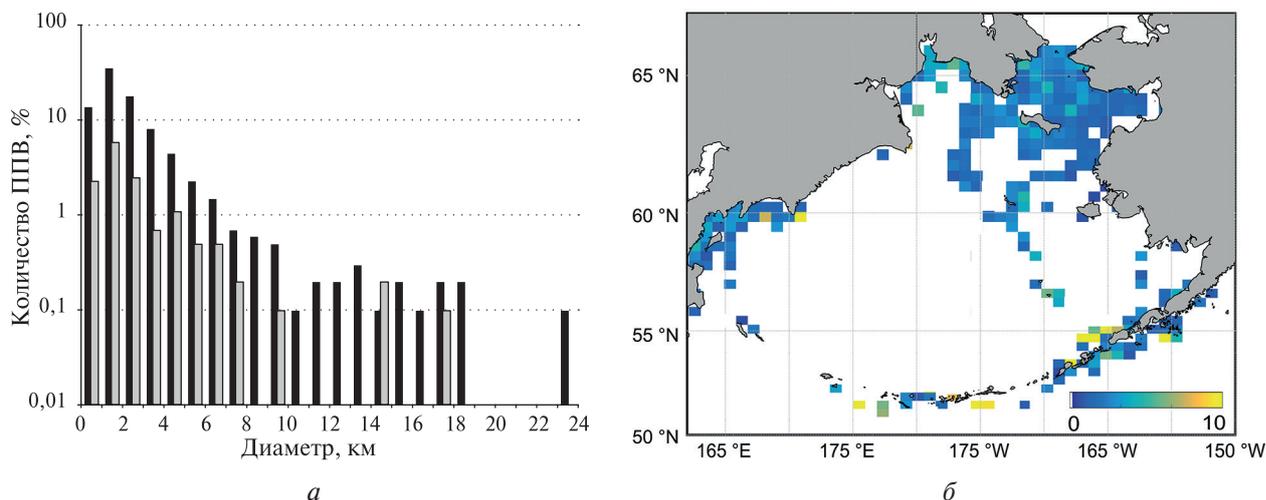


Рис. 3. Гистограмма количества вихрей в зависимости от диаметра (а); чёрный цвет относится к циклоническим проявлениям, серый — к антициклоническим. Пространственное распределение осреднённых диаметров ППВ (шкала в км) (б); ячейки сетки, где покрытие РЛИ было меньше среднего, закрашены белым цветом

Диаметр зарегистрированных проявлений варьировался от 300 м до 23 км (рис. 3а) при среднем значении 2,5 км. Детектировано 877 циклонических вихрей и 141 антициклонический, т.е. циклонический тип вращения регистрировался в 6 раз чаще, чем антициклонический. В целом на акватории преобладали вихри диаметром от 1 до 3 км, на них пришлось немногим более 65 % от всех зарегистрированных проявлений. На вихри с диаметром более 8 км пришлось менее 3 %. ППВ свыше 16 км практически не регистрировались. В подавляющем большинстве размерных классов встречаемость циклонов была выше, чем антициклонов (см. рис. 3а). При этом пространственное распределение сигнатур (рис. 3б) показывает, что вихри диаметром 1–3 км преобладали в мелководных районах моря, а ППВ с диаметром более 8 км регистрировались преимущественно в районе Алеутских о-вов и м. Олюторский.

Статистические характеристики зарегистрированных проявлений по месяцам представлены в таблице. Из неё видно, что в течение летнего периода регистрируется увеличение количества вихрей с июня по август. Пик вихреобразования (86 %) отмечается в последний

месяц летнего сезона как для циклонов, так и для антициклонов, при этом преобладание циклонического типа ППВ отмечалось во все месяцы. В июне и июле, когда регистрировалось менее 80 вихрей за месяц, средний диаметр вихрей был около 4,5 км. В августе, когда число ППВ возросло в 10 раз, оценки среднего диаметра вихревых структур уменьшились в два раза, но при этом средние диаметры циклонов и антициклонов практически совпадали.

Характеристики вихрей для всей акватории

Месяц	Количество, шт.			Средний диаметр (мин. – макс.), км		
	Сп	Ас	Общее	Сп	Ас	Общий
Июнь	59	1	60	4,6 (0,5–18,8)	1,5	4,6 (0–18,8)
Июль	66	11	77	4,2 (0,5–18,1)	6,2 (1,4–17,7)	4,4 (0,5–18,1)
Август	752	129	881	2,2 (0,3–23,7)	2,3 (0,2–14,3)	2,2 (0,2–23,7)

Для выявления причин столь значительной изменчивости ППВ были привлечены данные по приводному ветру, так как он выступает важнейшим параметром, влияющим на проявления морских процессов на РЛИ. На предварительном этапе было установлено, что средние за месяц скорости ветра на акватории моря в июне – июле составили около 4 м/с, в августе – 2 м/с. Согласно (Johannessen et al., 1996), данные скорости ветра не должны препятствовать детектированию структур, проявляющихся благодаря плёночному механизму. Но стоит отметить, что это средние оценки по акватории. Для более точного понимания рассмотрим подробно все ППВ за август 2020 г., зарегистрированные в северной части Берингова моря (район обозначен на рис. 1).

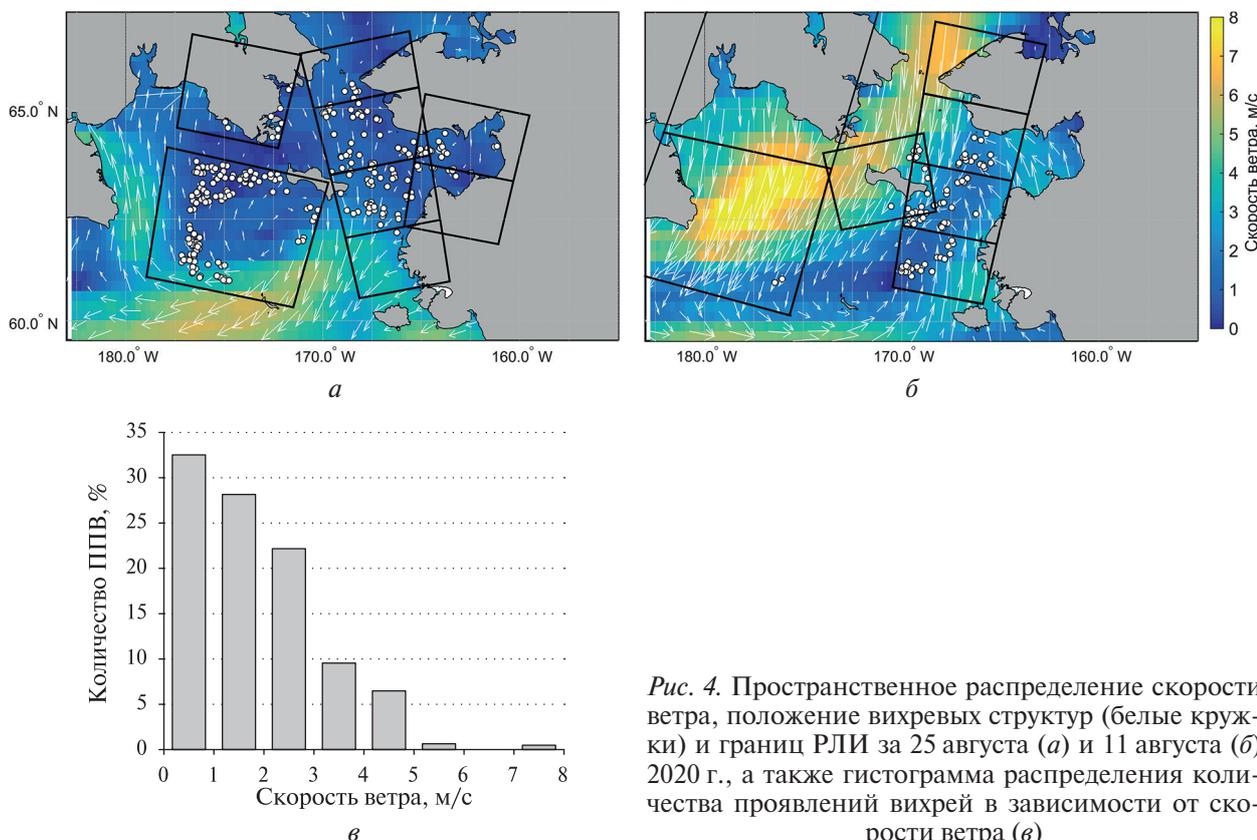


Рис. 4. Пространственное распределение скорости ветра, положение вихревых структур (белые кружки) и границ РЛИ за 25 августа (а) и 11 августа (б) 2020 г., а также гистограмма распределения количества проявлений вихрей в зависимости от скорости ветра (в)

Количество вихревых структур, зарегистрированных за сутки, в течение месяца варьировало от 0 до 245. В 8 случаях отмечалось более 20 ППВ за сутки, при этом на район прихо-

дилось от 5 до 9 снимков, и во всех этих случаях среднесуточный ветер на рассматриваемой акватории был меньше 4 м/с. Если средний ветер превышал указанную величину, то проявления вихрей на РЛИ не фиксировались даже при аналогичном покрытии акватории снимками.

В качестве примера рассмотрим ситуации, когда на район пришлось 7–8 РЛИ. Максимальное число вихрей в северной части Берингова моря отмечалось 25 августа. При среднесуточной скорости по всему району 2,1 м/с на 8 РЛИ отмечалось 245 вихревых проявлений, что составляет 28 % от числа вихрей за август и 23 % за весь исследуемый период (рис. 4а, см. с. 274). В тех районах, где регистрировались вихри, ветер был порядка 1–3 м/с, при этом в областях, покрытых РЛИ с ветром более 4 м/с, проявлений не отмечалось. Схожая ситуация сложилась 11 августа (рис. 4б), когда среднесуточная скорость ветра в районе составляла 3,5 м/с. На рассматриваемую область пришлось 7 РЛИ, большая часть из которых покрывала области со скоростью ветра более 4 м/с, где, собственно, и не отмечались ППВ. В результате было зарегистрировано 87 проявлений вихрей, которые преимущественно располагались восточнее и юго-восточнее от о. Св. Лаврентия, где отмечались лёгкие и слабые скорости ветра (до 4 м/с), как и в случае с 25 августа.

В качестве обобщения были оценены среднесуточные скорости ветра в центре каждой вихревой структуры, зарегистрированной в северной части моря в августе 2020 г. (рис. 4в). Было установлено, что большинство вихрей (92,5 %) регистрировалось при скоростях ветра до 4 м/с. И только почти 1,1 % проявлений, а это всего 7 вихрей, зафиксированы при скоростях более 5 м/с, а при скоростях более 8 м/с вихри вообще не регистрировались.

## Заключение

В работе на основе анализа радиолокационных изображений высокого разрешения впервые была оценена пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений малых вихрей за летний сезон 2020 г. на акватории Берингова моря. Всего за лето 2020 г. было зарегистрировано 1018 проявлений вихревых структур со средним диаметром около 2,5 км. Выполненное обобщение подтвердило гипотезу, что субмезомасштабные структуры — достаточно распространённое явление в северной мелководной части Берингова моря. Были детектированы ППВ разнообразных форм: одиночные, дипольные, грибовидные, цепочки вихрей, что говорит о многообразии механизмов генерации данных структур. При этом регистрировались вихри преимущественно циклонического типа, что соответствует результатам, полученным на других акваториях (например, Балтийском, Чёрном и Каспийском морях (Каримова, 2012), Белом море (Зимин, 2018), Баренцевом и Карском морях (Atadzhanova, Zimin, 2019), в Средиземном море (Gade, Stuhlmacher, 2019), в Восточно-Китайском море (Ji et al., 2021)). Средние оценки диаметров циклонических и антициклонических ППВ практически не различались.

Регистрация вихрей на РЛИ отмечалась только в областях скоростей ветра до 4 м/с. Показано, что при больших скоростях ветра проявление вихрей практически не регистрировалось, что отличается от результатов работ (Dokken, Wahl, 1996; Johannessen et al., 1996), где утверждается, что плёночный механизм, за счёт которого проявляются вихревые структуры на поверхности, «работает» при слабых и умеренных ветрах (до 6–7 м/с), а сдвигово-волновой механизм позволяет регистрировать вихри при скоростях ветра до 9 м/с (Gade, Stuhlmacher, 2019). Ввиду столь сильной зависимости проявлений вихревых структур на РЛИ от ветровых условий на акватории Берингова моря возникает необходимость обобщения многолетних архивов (за 8–10 лет) для получения корректной статистики, которая даст ключевые предпосылки районирования акватории моря по особенностям появления субмезомасштабных вихрей.

Авторы благодарны И. Е. Козлову, старшему научному сотруднику Морского гидрофизического института РАН, за предоставление программных кодов для обработки характеристик ППВ. Работа выполнена в рамках госзадания № FMWE-2021-0014.

## Литература

1. Белоненко Т.В., Новоселова Е.В. Методы оценки бароклинного радиуса деформации Россби: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ, 2019. 28 с. DOI:10.13140/RG.2.2.19145.16487.
2. Гинзбург А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // *Океанология*. 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997–1004.
3. Зимин А.В. Субприливные процессы и явления в Белом море. М: ГЕОС, 2018. 220 с.
4. Каримова С.С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 3. С. 152–160.
5. Каримова С.С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // *Исслед. Земли из космоса*. 2012. № 3. С. 31–47.
6. Коучмен Л.К., Огород К., Трипп Р.Б. Берингов пролив. Региональная физическая океанография: пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 199 с.
7. Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Чепыженко А.И., Алескерова А.А., Кубрякова Е.А., Медведева А.В., Станичный С.В. Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 2. С. 182–197. DOI: 10.31857/S0030157421020106.
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 // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019. V. 12. No. 3. P. 36–45. DOI: 10.7868/S2073667319030055.
9. Belevich T. A., Plyash L. V., Zimin A. V., Kravchishina M. D., Novikhin A. E., Dobrotina E. D. Peculiarities of summer phytoplankton spatial distribution in Onega Bay of the White Sea under local hydrophysical conditions // *Moscow Univ. Biological Sciences Bull.* 2016. V. 71. No. 3. P. 135–140. DOI: 10.3103/S0096392516030032.
10. Dokken S. T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Rapport 96/01463 / Norwegian Defence Research Establishment (NDRE), 1996. 29 p.
11. Gade M., Stuhlmacher A. Updated Eddy Statistics for the Western Mediterranean Based on Three Years of Sentinel-1A SAR Imagery // *Proc. IGARSS'19. Yokohama*, 2019. P. 8086–8089. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900051.
12. Ji Y., Xu G., Dong C., Yang J., Xia C. Submesoscale eddies in the East China Sea detected from SAR images // *Acta Oceanologica Sinica*. 2021. V. 40. P. 18–26. DOI: 10.1007/s13131-021-1714-5.
13. 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 ERS1 synthetic aperture radar // *J. Geophysical Research*. 1996. No. 101(C3). P. 6651–6667. DOI: 10.1029/95JC02962.
14. Kozlov I. E., Atadzhanova O. A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(1). Art. No. 134. 19 p. DOI: 10.3390/rs14010134.
15. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A. 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. DOI: 10.1029/2019JC015113.
16. Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Sabinin K. D. SAR observations of dynamic processes in the Bering Strait // *Atmospheric and Oceanic Processes, Dynamics, and Climate Change: Proc. SPIE*. 2003. V. 4899. P. 28–35. DOI: 10.1117/12.466366.
17. Lévy M., Ferrari R., Franks P. J. S., Martin A. P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. No. L14602. 13 p. DOI: 10.1029/2012GL052756.
18. 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. 123. P. 2635–2645. DOI: 10.1002/2017JC013728.
19. Parker-Stetter S., Urmy S., Horne J., Eisner L., Farley E. Factors affecting summer distributions of Bering Sea forage fish species: Assessing competing hypotheses // *Deep Sea Research Pt. 2: Topical Studies in Oceanography*. 2016. V. 134. P. 255–269. DOI: 10.1016/J.DSR2.2016.06.013.
20. 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. DOI: 10.1029/177GM04.
21. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Chapron B. Submesoscale Eddies in the White Sea Based on Satellite Radar Measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. No. 12. P. 1705–1711. DOI: 10.1134/S0001433821120306.

## Features of surface manifestations of small eddies in the Bering Sea in the summer season based on satellite radar images

O. A. Atadzhanova<sup>1,2</sup>, A. V. Zimin<sup>1,3</sup>, K. A. Kruglova<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>4</sup> Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia

The work presents the results of observations of small (submesoscale) eddy structures in the Bering Sea. These results were obtained by processing radar images from Sentinel-1A/B satellites, for the period from June to August 2020. Analysis of 704 images made it possible to identify 1018 cases of surface manifestations of eddies. Manifestations of various forms were detected: single, mushroom-like currents (eddy dipoles), eddy chains. On the basis of statistical analysis, the areas of their frequent occurrence were identified and the geometric characteristics of the identified structures, as well as the features of their manifestations, were assessed. Most of the eddies were detected in the northern shallow part of the sea. It was established that in the vast majority of cases eddies of cyclonic type of rotation were recorded. It was shown that the seasonally average structure diameter was the same for cyclonic and anticyclonic eddies and amounted to 2.5 km, which corresponds to the summer season average estimates of the Rossby baroclinic radius for the shallow water area. More than 85 % of the cases of eddy observations occurred in August, and the smallest (less than 5 %) number occurred in June. It has been established that at wind speeds of 4 m/s and more, eddy structures in the Bering Sea are recorded extremely rarely.

**Keywords:** submesoscale, radar images, small eddies, Bering Sea, Sentinel-1, Bering Strait

Accepted: 09.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278

### References

1. Belonenko T. V., Novoselova E. V., *Metody otsenki baroklinnogo radiusa deformatsii Rossbi* (Methods for estimating the baroclinic radius of Rossby deformation), Saint Petersburg: SPbGU, 2019, 28 p. (in Russian), DOI: 10.13140/RG.2.2.19145.16487.
2. Ginzburg A. I., Non-stationary vortical motion in the ocean, *Okeanologiya*, 1992, Vol. 32, No. 6, pp. 997–1004 (in Russian).
3. Zimin A. V., *Subprilivnye protsessy i yavleniya v Belom more* (Sub-tidal processes and phenomena in the White Sea), Moscow: GEOS, 2018, 220 p. (in Russian).
4. Karimova S. S., About vortical structures manifestation in satellite radar images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 152–160 (in Russian).
5. Karimova S. S., Statistical analysis of submesoscale eddies in the Baltic, Black and Caspian seas using satellite SAR images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 31–47 (in Russian).
6. Coachman L. K., Aagaard K., Tripp R. B., *Bering Strait the Regional physical oceanography*, Washington: Univ. of Washington Press, 1976, 172 p.
7. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Chepyzhenko A. I., Aleskerova A. A., Kubryakova E. A., Medvedeva A. V., Stanichnyi S. V., Impact of submesoscale eddies on the transport of suspended matter in the coastal zone of Crimea on the base of drones, satellite and in situ measurements, *Oceanology*, 2021, Vol. 61, No. 2, pp. 159–172.
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, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 36–45, DOI: 10.7868/S2073667319030055.
9. Belevich T. A., Ilyash L. V., Zimin A. V., Kravchishina M. D., Novikhin A. E., Dobrotina E. D., Peculiarities of summer phytoplankton spatial distribution in Onega Bay of the White Sea under local hydrophysical conditions, *Moscow Univ. Biological Sciences Bull.*, 2016, Vol. 71, No. 3, pp. 135–140, DOI: 10.3103/S0096392516030032.

10. Dokken S.T., Wahl T., *Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images*, FFI Rapport 96/01463, Norwegian Defence Research Establishment (NDRE), 1996, 29 p.
11. Gade M., Stuhlmacher A., Updated Eddy Statistics for the Western Mediterranean Based on Three Years of Sentinel-1A SAR Imagery, *Proc. IGARSS'19*, Yokohama, 2019, pp. 8086-8089, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900051.
12. Ji Y., Xu G., Dong C., Yang J., Xia C., Submesoscale eddies in the East China Sea detected from SAR images, *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, Vol. 40, pp. 18–26, DOI: 10.1007/s13131-021-1714-5.
13. 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 ERS1 synthetic aperture radar, *J. Geophysical Research*, 1996, No. 101(C3), pp. 6651–6667, DOI: 10.1029/95JC02962.
14. Kozlov I.E., Atadzhanova O.A., Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(1), Art. No. 134, 19 p., DOI: 10.3390/rs14010134.
15. Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A., 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, DOI: 10.1029/2019JC015113.
16. Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu., Sabinin K.D., SAR observations of dynamic processes in the Bering Strait, *Atmospheric and Oceanic Processes, Dynamics, and Climate Change: Proc. SPIE*, 2003, Vol. 4899, pp. 28–35, DOI: 10.1117/12.466366.
17. Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P., Bringing physics to life at the submesoscale, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. L14602, 13 p., DOI: 10.1029/2012GL052756.
18. 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. 123, pp. 2635–2645, DOI: 10.1002/2017JC013728.
19. Parker-Stetter S., Urmy S., Horne J., Eisner L., Farley E., Factors affecting summer distributions of Bering Sea forage fish species: Assessing competing hypotheses, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, Vol. 134, pp. 255–269, DOI: 10.1016/J.DSR2.2016.06.013.
20. 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, DOI: 10.1029/177GM04.
21. Zimin A.V., Atazhanova O.A., Romanenkov D.A., Kozlov I.E., Chapron B., Submesoscale Eddies in the White Sea Based on Satellite Radar Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 2, pp. 1705–1711, DOI: 10.1134/S0001433821120306.