

Малые вихревые структуры Берингова моря и шельфа Курило-Камчатского региона по данным спутниковой радиолокации за тёплый период 2020–2021 гг.

А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, А. А. Коник¹, К. А. Круглова¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: zimin2@mail.ru

² *Санкт-Петербургский государственный университет*
Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*

Представлены результаты анализа наблюдений за пространственно-временной изменчивостью проявлений малых вихревых структур с июня по сентябрь 2020–2021 гг. в шельфовых районах Берингова моря и Курило-Камчатского региона на основе анализа радиолокационных изображений. В качестве исходных данных использовались 3300 высокоразрешающих изображения Sentinel-1A/B. Было зарегистрировано 1704 поверхностные проявления вихревых структур, из них 1449 циклонические и 255 антициклонические. Большая часть проявлений вихрей зафиксирована в северной мелководной части Берингова моря, в заливах Олюторском и Карагинском и проливах Буссоль и Четвёртый Курильский. Средний диаметр вихревых структур в Беринговом море составил 2,9 км, в Курило-Камчатском регионе — 4,3 км, что соответствует средним за летний сезон оценкам бароклинного радиуса Россби для мелководных районов рассматриваемых акваторий. Установлено, что в Беринговом море средние диаметры субмезомасштабных циклонических и антициклонических вихрей совпадали, а в Курило-Камчатском регионе диаметры циклонических вихрей превышали диаметры антициклонических почти в два раза. Вихри чаще всего регистрировались в августе в условиях максимального развития сезонного пикноклина в обоих регионах. Обнаружена значительная межгодовая изменчивость количества и характеристик детектируемых вихрей. Приведён пример регистрации группы циклонических субмезомасштабных вихревых структур на периферии более крупного антициклонического образования.

Ключевые слова: спутниковые радиолокационные изображения, Sentinel-1, статистические характеристики вихрей, субмезомасштаб, шельф Курило-Камчатского региона, Берингово море

Одобрена к печати: 11.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-239-249

Введение

Спутниковые изображения высокого разрешения представляются основным источником сведений о поверхностных проявлениях малых вихревых структур (Ivanov, Ginzburg, 2002). На основе обобщения обширных архивов спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) было показано, что вихри с размерами от сотен метров до десятка километров, часто называемые субмезомасштабными, представляют собой распространённое явление на разных акваториях Мирового океана (Артамонова и др., 2020; Митягина, Лаврова, 2009; Atadzhanova, Zimin, 2019; Karimova, Gade, 2016). Верхняя граница субмезомасштабных вихревых структур определяется радиусом деформации Россби ($R = HN/f\pi$, где H — толщина водного слоя, N — частота Вайселя–Брента, f — параметр Кориолиса). Величина бароклинного радиуса Россби зависит от широты, стратификации плотности и глубины (Thomas et al., 2008). Предполагается, что субмезомасштабные вихри характеризуются числом Россби порядка единицы и значительной вертикальной скоростью (Зацепин и др., 2011). Это и определяет их роль в интенсификации переноса тепла и вещества в районах их частой встречаемости, что может оказывать влияние на биогеохимические процессы и биологическую продуктивность региона (Lévy et al., 2012). Однако информация о районах частой регистрации этих структур, сезонной и межгодовой изменчивости в дальневосточных морях России, важных

с точки зрения промыслового использования, на сегодняшний день носит отрывочный характер. Хотя по результатам послонных обловов икры минтая в Авачинском зал. (Варкентин, Саушкина, 2022) отмечались её подъём и опускание под влиянием гидродинамических процессов схожего масштаба.

Регион исследования в данной работе будет охватывать районы активного рыболовства (Балыкин и др., 2014), а именно Берингово море, прибрежную акваторию п-ова Камчатка и Курильских о-вов. В указанных районах Тихого океана бароклинный радиус Россби изменяется от 0,8 до 25 км (Белоненко, Новоселова, 2019; Степанов, 2017). Первые сведения о проявлении вихревых структур с указанными размерами на радиолокационных изображениях Берингова моря представлены в работе (Lavrova et al., 2003). Обобщение данных наблюдений за июнь–август 2020 г. (Атаджанова и др., 2022) подтвердило гипотезу, что субмезомасштабные структуры со средним размером около 2,5 км преимущественно циклонического типа вращения представляют собой распространённое явление, особенно в северной мелководной части Берегова моря. Кроме того, были детектированы поверхностные проявления вихрей (ППВ) разнообразных форм: одиночные, дипольные, грибовидные, цепочки вихрей, что говорит о многообразии механизмов генерации данных структур.

В Курило-Камчатском регионе по данным инфракрасных (ИК) сенсоров высокого разрешения спутника Landsat Thematic Mapper показано (Nakamura et al., 2012) наличие вихрей с диаметрами от 2 до 3 км между проливом Фриза и Четвёртым Курильским проливом с преобладанием антициклонических вихрей над циклоническими. В работе (Жабин, Андреев, 2014) установлено, что вблизи глубоководной Курильской котловины субмезомасштабные циклонические вихри формируются на фронтах приливного перемешивания и в районе пролива Буссоль. Под их влиянием происходит поступление холодных и богатых биогенными элементами вод в Курильскую котловину. Также было выявлено (Атаджанова и др., 2021), что вихревые структуры размером от сотен метров до 5 км преимущественно циклонического типа вращения регистрировались в Авачинском и Кроноцком заливах около п-ова Камчатка в тёплый период 2020 г. Однако все эти сведения не формируют целостной картины о распространённости и характеристиках малых вихревых структур в рассматриваемом регионе.

Таким образом, цель настоящей работы — заполнить пробелы в области изучения пространственно-временной изменчивости характеристик малых (от сотен метров до первых десятков километров) вихревых структур в тёплый сезон на прибрежных акваториях Берингова моря и Курило-Камчатского региона на основе анализа радиолокационных изображений за июнь–сентябрь 2020 и 2021 гг.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались 3300 высокоразрешающих радиолокационных изображений Sentinel-1A/B, полученных в режимах съёмки IW (*англ.* Interferometric Wide Swath, интерферометрический широкозахватный) и EW (*англ.* ExtraWide, сверх-широкозахватный), с разрешением 20 и 90 м соответственно, за период с 1 июня по 30 сентября 2020–2021 гг. (за 2020 г. — 1564 шт., за 2021 г. — 1636 шт.). Карта покрытия радиолокационными изображениями исследуемых акваторий представлена на *рис. 1* (см. с. 241), где видно, что покрытие района довольно неравномерно. Максимальное покрытие наблюдается в прибрежных акваториях материков и районах островных дуг. В анализе не учитывались районы, не покрываемые РЛИ (область показана белым цветом на *рис. 1*), в среднем покрытие по всей акватории составило около 36 РЛИ за период. Покрытие выше в мелководной зоне Берингова моря и прибрежной части Курило-Камчатского региона (около 60 РЛИ за период).

Вихри регистрировались как структуры, проявляющиеся на РЛИ в виде закрученных в спирали или дуги контрастных полос (см. врезка на *рис. 1*). Отметим, что в настоящей работе вихри преимущественно визуализировались за счёт плёночного механизма (Каримова, 2010), когда из-за конвергенции на поверхности воды образуются нитевидные слики, которые закручиваются в спираль. Вихри, регистрируемые за счёт сдвигово-волнового механизма, отмечались гораздо реже.

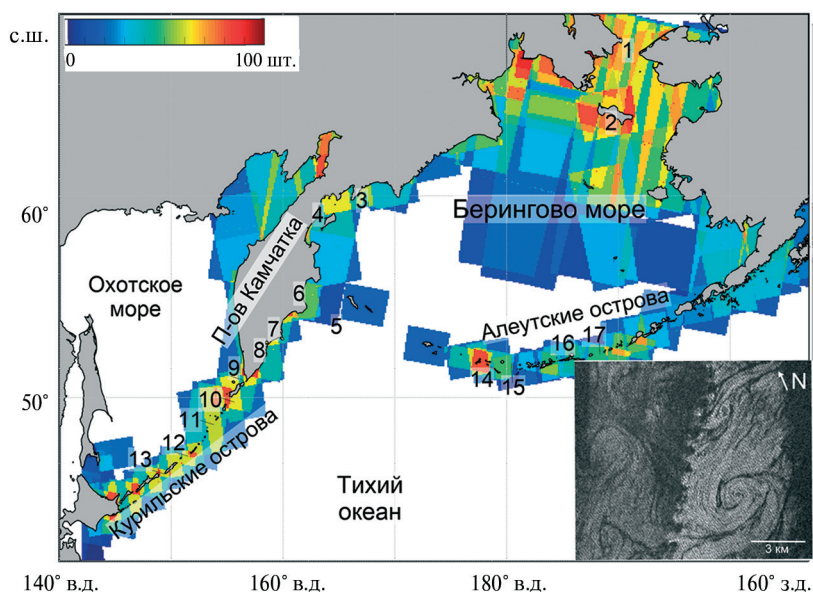


Рис. 1. Карта покрытия РЛИ Берегова моря и прибрежной части Курило-Камчатского региона за июнь–сентябрь 2020–2021 гг. На врезке — фрагмент РЛИ от 21.09.2021, 19:23 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) с примером поверхностных проявлений вихрей между п-овом Камчатка и Командорскими о-вами. 1 — Берингов пролив; 2 — о. Св. Лаврентия; 3 — Олюторский зал.; 4 — Карагинский зал.; 5 — Командорские о-ва; 6 — Камчатский зал.; 7 — Кроноцкий зал.; 8 — Авачинский зал.; 9 — 1-й Курильский пролив; 10 — 4-й Курильский пролив; 11 — пролив Крузенштерна; 12 — пролив Буссоль; 13 — пролив Фризе; 14 — Андреяновские о-ва; 15 — пролив Амчитка; 16 — Крысьи о-ва; 17 — пролив Амухта

Для оценки характеристик вихрей использовалась уже многократно отработанная методика (Atadzhanova, Zimin, 2019), в рамках которой определялись координаты центра, диаметр и тип вращения (циклонические (Сп) — против часовой стрелки, антициклонические (Ас) — по часовой стрелке).

Ввиду зависимости проявлений вихрей на РЛИ от ветровых условий (Атаджанова и др., 2022; Каримова, 2010) использовались часовые (которые затем усреднялись до суток) и среднемесячные данные о характеристиках приводного ветра из реанализа European Reanalysis 5-го поколения (ERA5) с шагом $0,25 \times 0,25^\circ$, взятые с сайта <https://cds.climate.copernicus.eu>. Дополнительно за отдельные дни привлекались данные о скорости течений на поверхности $0,083 \times 0,083^\circ$ из продукта CMEMS (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service) GLORYS12V1, данные видимого диапазона канала Rrs-488 (синий цвет) с разрешением 1 км и поля температуры разрешением $0,05 \times 0,05^\circ$ уровня L3 спутника MODIS/Aqua (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) для определения положения мезомасштабных вихрей.

Результаты

Всего за два года было зарегистрировано 1704 ППВ. Детектировано 1449 циклонических и 255 антициклонических вихрей. Большая часть проявлений вихрей зафиксирована в северной мелководной части Берингова моря и шельфах Камчатского п-ова, Курильских и Командорских островов (рис. 2а, см. с. 242). Абсолютный максимум встречаемости ППВ отмечен южнее Берингова пролива и восточнее о. Св. Лаврентия, акваториях Карагинского и Олюторского заливов. Отмечались группы вихрей как в виде цепочек и одиночных структур, так и диполей. Подобные проявления характерны для районов, где наблюдается локальный сдвиг течений, например под воздействием вдольбереговых потоков, топографии дна или взаимодействия вод разного генезиса.

Диаметр зарегистрированных проявлений варьировался от 200 м до 33,8 км при среднем значении около 3,2 км, распределение по размерам на акватории представлено на рис. 2б. Чаще всего (в 83 % случаев) на акватории регистрировались вихри диаметром от 1 до 5 км. Они преобладали в мелководных районах северной части Берингова моря и на шельфе п-ова Камчатка. Крупные вихри с диаметром более 8 км регистрировались значительно реже (~8 % случаев), преимущественно в областях с резкими перепадами глубин около Курильского архипелага (Первого и Четвёртого Курильского проливов, проливов Крузенштерна, Буссоль, Фриза (и в самом проливе)) и Алеутского архипелага (с беринговоморской стороны пролива Амукта, с тихоокеанской стороны Андреяновских и Крысыных островов, пролива Амчитка). ППВ свыше 16 км регистрировались всего в 1 % случаев и отмечались преимущественно с охотоморской стороны Курильских о-вов. Отметим, что в подавляющем большинстве зарегистрированные проявления вихрей относились к субмезомасштабному интервалу изменчивости явлений.

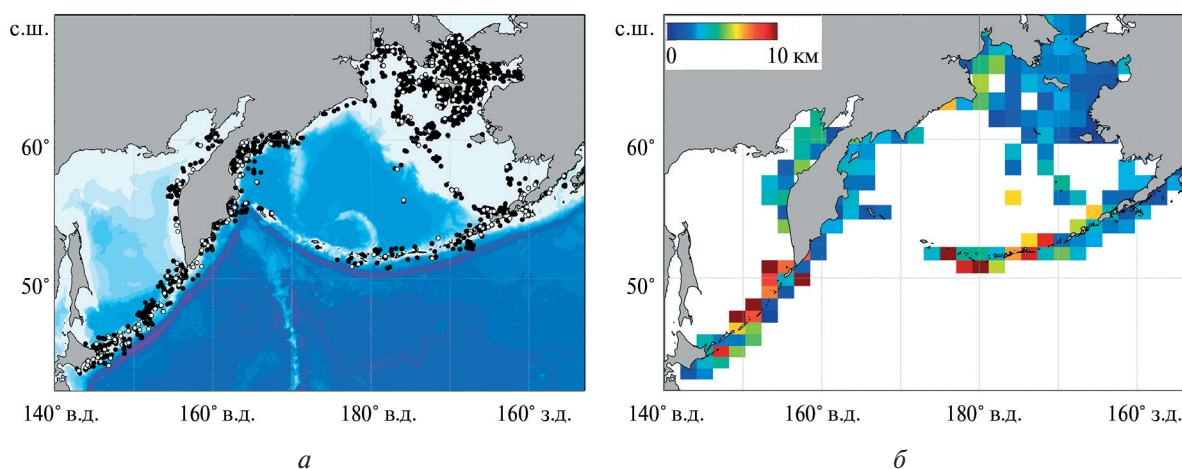


Рис. 2. Пространственное распределение характеристик вихревых структур за июнь–сентябрь 2021–2022 гг.: положение центров вихрей (а) и средние диаметры вихрей на единицу сетки (б) за весь исследуемый период. На карте (а) чёрные кружки — вихри циклонического типа вращения, белые — антициклонического

На рис. 3 (см. с.243) приведена помесечная изменчивость положений центров зарегистрированных вихрей с учётом типа вращения. Вихри чаще всего регистрировались в августе (см. рис. 3в), когда приповерхностный пикноклин был максимально развит на всей рассматриваемой акватории. На этот месяц пришлось ~72 % всех зарегистрированных вихревых структур, и их распределение определило общую картину встречаемости вихрей на исследуемой акватории. Такие особенности могут объясняться как спецификой ветровых условий, благоприятных для регистрации проявлений вихрей на РЛИ (Атаджанова и др., 2022), так и развитием различных видов неустойчивости в условиях интенсивного формирования верхнего квазиоднородного слоя (Зимин, 2018). На остальные месяцы приходится примерно по 10 % от зарегистрированных проявлений. В июне и июле (см. рис. 3а и б), в период формирования приповерхностного пикноклина, вихри регистрируются преимущественно в областях взаимодействия вод разного генезиса: в акватории Курильских и Алеутских островов (морских и океанских) и южнее Берингова пролива (шельфовых и морских). В сентябре (см. рис. 3г), когда в прибрежных районах идёт интенсивное выхолаживание, наибольшее количество вихрей встречается в заливах около Камчатского п-ова. Во все месяцы количество циклонов на акватории больше, чем антициклонов, при этом встречаемость антициклонических вихрей выше в Курило-Камчатском регионе, чем в Беринговом море.

Статистические характеристики зарегистрированных проявлений по месяцам представлены в таблице. Видно, что количество зарегистрированных вихревых структур в разы меня-

ется по годам, но при этом основные тенденции внутрисезонной изменчивости сохраняются. Максимум встречаемости приходится на август, циклоны наблюдаются в разы чаще антициклонов. Исключение отмечается в 2021 г. в Курило-Камчатском регионе, когда за сезон было зарегистрировано немногим более 100 вихрей и максимум вихревой активности был отмечен в июле. Отметим, что в 2021 г. по сравнению с 2020 г. регистрируются более крупные вихревые структуры в обоих регионах. Малые вихревые структуры встречаются чаще в Беринговом море, а их средний диаметр меньше, чем в Курило-Камчатском регионе. Кроме того, в рассматриваемых регионах разное соотношение между диаметрами циклонических и антициклонических вихрей. В Курило-Камчатском регионе циклонические вихри в среднем крупнее антициклонических, что в работе (Nakamura et al., 2012) объясняется влиянием ассиметричной адвекции вращающегося приливного потока в области Курильских проливов.

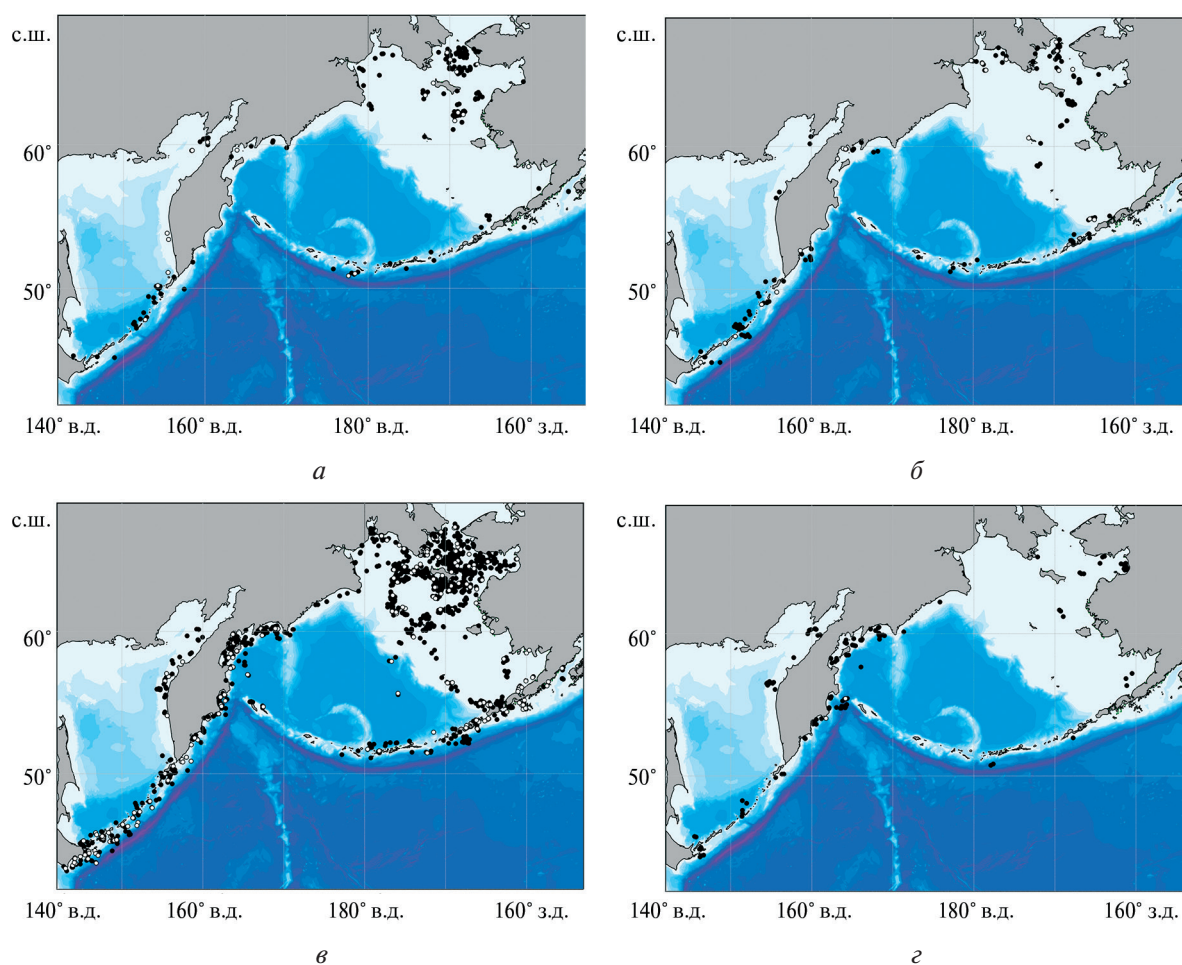


Рис. 3. Пространственное распределение количества вихрей по месяцам за 2021–2022 гг.: а — июнь; б — июль; в — август; г — сентябрь. Белые кружки — антициклоны; чёрные кружки — циклоны

Для выявления причин столь значительной изменчивости ППВ как по времени, так и по пространству были привлечены данные по приводному ветру, так как он становится важнейшим параметром, влияющим на проявления процессов и явлений на РЛИ. Анализ среднемесячных карт поля ветра за тёплый период 2020 и 2021 гг. показал, что для исследуемого района были характерны умеренные и сильные ветры, создаваемые проходящими с запада на восток атмосферными циклонами. Чаще всего слабые ветры отмечались в прибрежных районах около континентов, что объясняет особенности пространственного распределения вихревых структур, представленных на рис. 2. Но для объяснения отмеченной на рис. 3 и в таблице пространственно-временной изменчивости требуется более детальный анализ.

Характеристики вихрей для всей акватории

Регион	Год	Месяц	Количество			Диаметр, км		
			Сп	Ас	Итого	Сп	Ас	Итого
Берингово море	2020	Июнь	59	1	60	4,6 (0,5–18,8)	1,5	4,6
		Июль	65	11	76	4,2 (0,5–18,1)	6,2 (1,4–17,7)	4,5
		Август	752	129	881	2,2 (0,3–23,7)	2,3 (0,2–14,4)	2,2
		Сентябрь	30	0	30	5,5 (2–13,9)	0,0	5,5
		Итого	906	141	1047	2,6	2,6	2,6
	2021	Июнь	76	12	88	4,1 (0,9–16,6)	3,7 (0,7–10,4)	4,0
		Июль	40	10	50	3,5 (0,9–14,5)	4,2 (0,7–6,9)	3,6
		Август	88	2	90	4,3 (0,7–16,3)	8,8 (2,1–5,5)	4,4
		Сентябрь	28	0	28	4,4 (1,5–11)	0,0	4,4
		Итого	232	24	256	4,1	4,4	4,1
Итого		1138	165	1303	2,9	2,9	2,9	
Курило-Камчатский	2020	Июнь	12	0	12	14,4 (5–32,9)	0,0	14,4
		Июль	8	1	9	9 (2–14,9)	3,4	8,4
		Август	154	72	226	1,9 (0,3–17)	1,7 (1,7–2,4)	1,8
		Сентябрь	37	2	39	5,5 (0,7–23,1)	2 (1,7–2,4)	5,3
		Итого	211	75	286	3,5	1,7	3,1
	2021	Июнь	18	7	25	8,7 (2,2–18,4)	7,5 (1–22,9)	8,3
		Июль	36	5	41	10 (1–33,8)	9,7 (1,6–18,7)	9,9
		Август	23	3	26	4,7 (1,6–8,9)	5,2 (1,1–7,4)	4,8
		Сентябрь	23	0	23	5,5 (0,7–26,8)	0,0	5,5
		Итого	100	15	115	7,5	7,8	7,5
	Итого		311	90	401	4,8	2,7	4,3

В качестве примера на *рис. 4а* (см. с. 245) приведена композитная карта за 21.09.2020, где цветом обозначена скорость ветра, линией — границы РЛИ, кругами — положение центров вихрей, зарегистрированных на РЛИ. Видно, что вихри детектировались при скоростях ветра менее 6 м/с и ветровые условия накладывали значительные ограничения на возможности регистрации. Аналогичная карта для скорости течений представлена на *рис. 4б*, которая показывает, что вихри отмечались в районе сдвига скорости, где перепад составляет от 0,1 до 0,15 м/с. При этом в районах с высокими скоростями течений (более 0,3 м/с) вихри не отмечались, несмотря на малые скорости ветра и, соответственно, хорошие условия для их детектирования.

Как показал совместный анализ радиолокационных и оптических изображений, одной из частых причин образования большого числа малых вихрей в Курило-Камчатском регионе является горизонтальных сдвиг или значительный градиент завихренности на периферии мезомасштабных антициклонов аналогично тому, как описано в работе (Aleskerova et al., 2021). На внешней границе крупных вихрей интенсивное трение разнонаправленных потоков формировало большое число субмезомасштабных циклонических вихрей. Пример такого процесса представлен на композитном *рис. 5* (см. с. 245), где, по данным MODIS/Aqua, в видимом диапазоне 05.08.2020 регистрируется мезомасштабный вихрь диаметром около 90 км, а на его периферии крестиками отмечены положения центров малых вихрей за те же сутки. Кроме того, одиночная циклоническая субмезомасштабная вихревая структура детектировалась в области чуть восточнее центра мезомасштабного вихря, где также можно ожидать значительный сдвиг скорости течений. Видно, что мезомасштабный вихрь транспор-

тирует взвешенное вещество (см. *рис. 5а*) и большой объём тепла (см. *рис. 5б*) в орбитальном направлении вдоль побережья Короноцкого зал., а на внешней границе, в области относительно холодных вод, за счёт неустойчивости и трения регистрируются как одиночные, так и дипольные малые вихревые структуры. Отметим, что мезомасштабные антициклонические вихри в бухтах Камчатки регистрируются весьма часто (Prants et al., 2020) и, соответственно, генерация субмезомасштабных структур на их периферии за счёт сдвига скорости может быть весьма распространённым процессом.

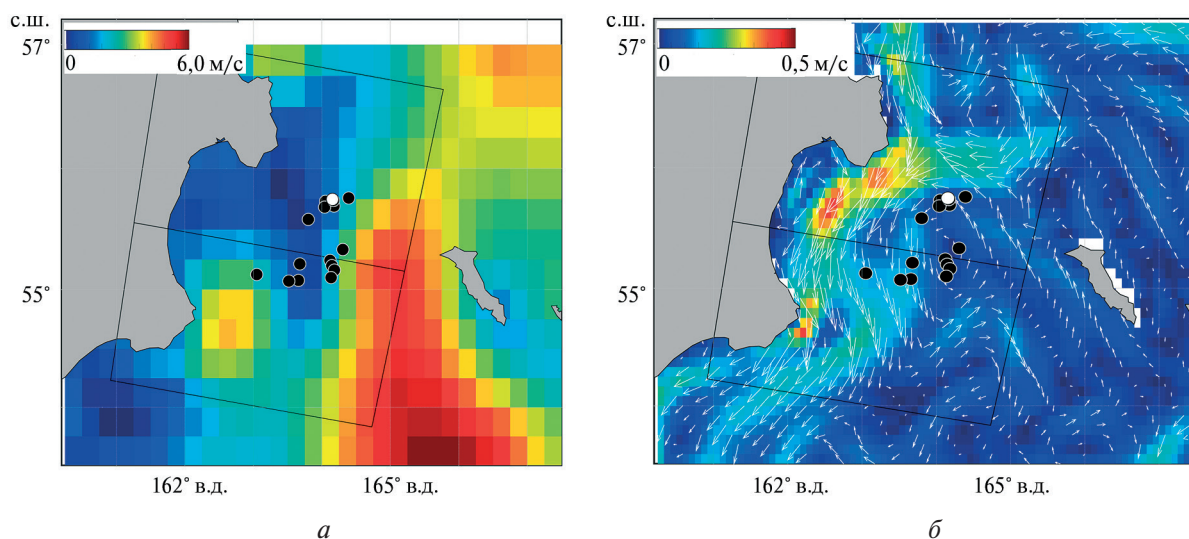


Рис. 4. Пространственное распределение скорости ветра (*а*) и скорости и направления течений (*б*) в районе между Камчатским зал. и Командорскими о-вами. На обоих изображениях приведено положение центров вихревых структур (белые кружки — антициклоны, чёрные кружки — циклоны), а также границ РЛИ за 21.09.2020

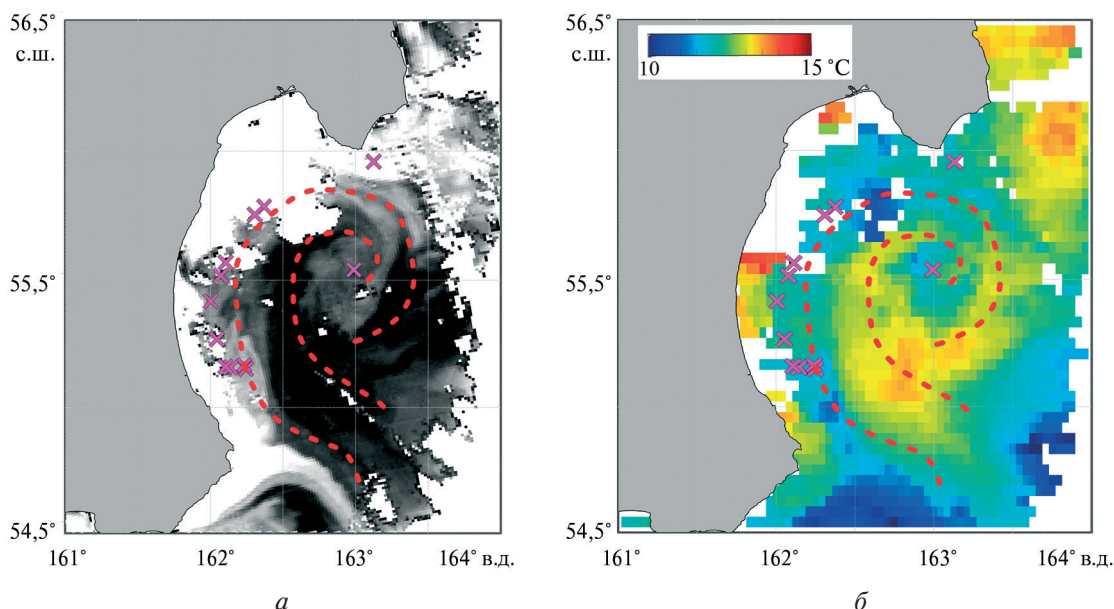


Рис. 5. Фрагмент изображения в видимом диапазоне (канал Rrs-488) (*а*) и поле температуры (уровень L3) MODIS/Aqua (*б*) за 5 августа 2020 г. Крестиками отмечены положения субмезомасштабных вихрей, зарегистрированных на РЛИ; пунктиром схематично показано положение мезомасштабного вихря в тот же день

Обсуждение и выводы

В работе на основе анализа радиолокационных изображений высокого разрешения за тёплый период двух лет была оценена изменчивость поверхностных проявлений малых вихрей на акватории важных в промысловом отношении регионов Берингова моря и Курило-Камчатского шельфа за тёплый сезон. Всего было зарегистрировано более 1700 проявлений вихревых структур со средним диаметром около 3,2 км, что не превышает оценок радиуса Россби для рассматриваемого региона. Выполненное обобщение показало, что субмезомасштабные структуры представляют собой распространённое явление в северной мелководной части Берингова моря, на шельфе тихоокеанского побережья Камчатского п-ова и регионе Курильских о-вов в период максимального развития сезонного приповерхностного пикноклина. Установлена значительная межгодовая изменчивость количества и характеристик детектируемых субмезомасштабных вихревых структур. Однако следует заметить, что наблюдаемые особенности межгодовой изменчивости характеристик исследуемых вихрей могут зависеть от многих факторов, включая недостаточное покрытие акватории радиолокационными снимками, и требуют дополнительного рассмотрения.

В целом за два года регистрировались вихри преимущественно циклонического типа, что соответствует результатам, полученным на других акваториях (Артамонова и др., 2020; Митягина, Лаврова, 2009; Atadzhanova, Zimin, 2019; Karimova, Gade, 2016). Средние оценки диаметров циклонических и антициклонических ППВ практически не различались между собой в Беринговом море, тогда как в Курило-Камчатском регионе циклонические образования были в среднем крупнее, что, вероятно, связано с влиянием ассиметричной адвекции вращающегося приливного потока, который переносит циклонические вихри от берега, а антициклонические — в сторону берега (Nakamura et al., 2012).

Для отдельных случаев показано, что малые вихри в Курило-Камчатском регионе, регистрируемые при скоростях ветра менее 6 м/с, в заливах Камчатского п-ова отмечались преимущественно в районах сдвига горизонтальных скоростей течений и на внешней границе мезомасштабного вихря (аналогично показанному в работе (Aleskerova et al., 2021)). С учётом частой встречаемости мезомасштабных структур в данном регионе (Prants et al., 2020) сдвиг течения на их периферии может быть одним из основных механизмов генерации малых вихревых структур.

Следующие работы будут направлены не только на расширение временной базы исследования, но и на поиск связей пространственно-временной изменчивости характеристик вихревых структур и ихтиопланктонного вылова (икры и личинок минтая).

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00174 (<https://rscf.ru/project/23-17-00174/>).

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., Коник А. А., Зимин А. В., Данилов И. А., Джамалова А. Г., Завада Д. Е. Субмезомасштабные вихри в Дальневосточных морях РФ в августе 2020 г. по радиолокационным изображениям // Всерос. науч. конф. «Моря России: год науки и технологий в РФ — десятилетие наук об океане ООН»: тез. докл. Севастополь, 20–24 сент. 2021. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2021. С. 211.
3. Атаджанова О. А., Зимин А. В., Круглова К. А. Особенности поверхностных проявлений малых вихрей в Беринговом море в летний сезон по данным спутниковых радиолокационных изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 270–278. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278.
4. Балькин П. А., Бонк А. А., Старцев А. В. Оценка состояния запасов и управление промыслом морских рыб (на примере минтая, сельди и сайры). Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Петропавловск-Камчатский, 2014. 63 с.

5. 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.
6. Варкентин А. И., Саушкина Д. Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Тр. Всерос. научно-исслед. ин-та рыбного хоз-ва и океанографии. 2022. Т. 189. С. 105–119. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-105-119.
7. Жабин И. А., Андреев А. Г. Взаимодействие мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 75–86. DOI: 10.7868/S0205961414030075.
8. 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.
9. Зимин А. В. Субприливные процессы и явления в Белом море. М.: ГЕОС, 2018. 220 с.
10. Каримова С. С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 152–160.
11. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне Северо-Восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
12. Степанов Д. В. Оценка бароклинного радиуса деформации Россби в Охотском море // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 83–89.
13. Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S. et al. Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements // Ocean Dynamics. 2021. V. 71. No. 6–7. P. 655–677. DOI: 10.1007/s10236-021-01458-9.
14. 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.
15. Ivanov A. Y., Ginzburg A. I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // J. Earth System Science. 2002. V. 111. No. 3. P. 281–295. DOI: 10.1007/bf02701974.
16. Karimova S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 10. P. 2394–2414. DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
17. 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.
18. Lévy M., Ferrari R., Franks P. J. S. et al. Bringing physics to life at the submesoscale // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 14. Article L14602. DOI: 10.1029/2012gl052756.
19. Nakamura T., Matthews J. P., Awaji T., Mitsudera H. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow // J. Geophysical Research. 2012. No. 117. Article C12014. DOI: 10.1029/2011JC007754.
20. Prants S. V., Budyansky M. V., Lobanov V. B. et al. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka tracheddies // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. Article e2020JC016187. DOI: 10.1029/2020JC016187.
21. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddy Regime. Geophysical Monograph Ser. 2008. V. 177. P. 17–38. DOI: 10.1029/177GM04.

Small eddy structures of the Bering Sea and the shelf of the Kuril-Kamchatka region based on satellite radar data in the warm period 2020–2021

A. V. Zimin^{1,2}, O. A. Atadzhanova^{1,3}, A. A. Konik¹, K. A. Kruglova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: ziminz@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

³ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

The paper presents the results of analysis of observations of the spatial and temporal variability of manifestations of small eddy structures from June to September 2020–2021 in the shelf areas of the Bering Sea and the Kuril-Kamchatka region based on radar images. 3300 high-resolution Sentinel-1A/B images were used as input data. 1704 surface manifestations of eddy structures were registered, of which 1449 were cyclonic and 255 anticyclonic. Most of the manifestations of eddies were recorded in the northern shallow water part of the Bering Sea, in the Olutorsky and Karaginsky bays and in the Bussol and Fourth Kuril straits. The average diameter of eddies structures in the Bering Sea was 2.9 km, in the Kuril-Kamchatka region 4.3 km, which corresponds to the average summer season estimates of the baroclinic Rossby radius for the shallow water areas under consideration. It was established that in the Bering Sea the mean diameters of submesoscale cyclonic and anticyclonic eddies coincided, and in the Kuril-Kamchatka region the diameters of cyclonic eddies exceeded the anticyclonic ones almost two-fold. Significant interannual variability in the quantity and characteristics of detected eddies has been identified. An example is given of a group of cyclonic sub-mesoscale eddies structures that occurred on the periphery of a larger anticyclonic formation.

Keywords: satellite radar images, Sentinel-1, statistical characteristics of eddies, submesoscale, shelf of the Kuril-Kamchatka region, Bering Sea

Accepted: 11.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-239-249

References

1. Artamonova A. V., Kozlov I. E., Zimin A. V., Characteristics of ocean eddies in the Beaufort and Chukchi Sea from spaceborne radar observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 203–210 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210.
2. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Kruglova K. A., Features of surface manifestations of small eddies in the Bering Sea in the summer season based on satellite radar images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 270–278 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278.
3. Atadzhanova O. A., Konik A. A., Zimin A. V., Danilov I. A., Dzhamalova A. G., Zavada D. E., Submesoscale eddies in the Far Eastern Seas of the Russian Federation in August 2020 by radar images, *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Morya Rossii: god nauki i tekhnologii v RF — desyatiletie nauk ob okeane OON"* (All-Russian Scientific Conf. "The Seas of Russia: the Year of Science and Technology in the Russian Federation — the UN Decade of Ocean Sciences"), Book of abstr., Sevastopol, 20–24 Sept. 2021, Sevastopol: MHI RAS, 2021, p. 211 (in Russian).
4. Balykin P. A., Bonk A. A., Startsev A. V., *Stock assessment and management of marine fish (using the example of pollock, herring and saury)*, Petropavlovsk-Kamchatsky: Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF Rossii), 2014, 63 p. (in Russian).
5. Belonenko T. V., Novoselova E. V., *Metody otsenki baroklinnogo radiusa deformatsii Rossbi: uchebnoe posobie* (Methods for estimating the Rossby baroclinic deformation radius), Saint Petersburg: SPbGU, 2019, 28 p. (in Russian), DOI: 10.13140/RG.2.2.19145.16487.
6. Varkentin A. I., Saushkina D. Ya., Some issues of walleye pollock reproduction in the pacific waters adjacent to the Kamchatka peninsula and the northern Kuril Islands in 2013–2022, *Trudy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaistva i okeanografii*, 2022, Vol. 189, pp. 105–119 (in Russian), DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-105-119.

7. Zhabin I. A., Andreev A. G., Interaction of mesoscale and submesoscale vortices in the Sea of Okhotsk according to satellite observations, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 75–86 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414030075.
8. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Ostrovskii A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Soloviev D. M., *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 554–567.
9. Zimin A. V., *Sub-tidal processes and phenomena in the White Sea*, Moscow: GEOS, 2018, 220 p. (in Russian).
10. Karimova S. S., About vortical structures manifestation in satellite radar images, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 152–160 (in Russian).
11. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Satellite observations of vortex and wave processes in the coastal zone of the Northeastern part of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 72–79 (in Russian).
12. Stepanov D., Estimating the baroclinic Rossby radius of deformation in the Sea of Okhotsk, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, Vol. 42, pp. 601–606, DOI: 10.3103/S1068373917090072.
13. Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S. et al., Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements, *Ocean Dynamics*, 2021, Vol. 71, No. 6–7, pp. 655–677, DOI: 10.1007/s10236-021-01458-9.
14. 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.
15. Ivanov A. Y., Ginzburg A. I., Oceanic eddies in synthetic aperture radar images, *J. Earth System Science*, 2002, Vol. 111, No. 3, pp. 281–295, DOI: 10.1007/bf02701974.
16. Karimova S., Gade M., Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 10, pp. 2394–2414, DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
17. 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.
18. Lévy M., Ferrari R., Franks P. J. S. et al., Bringing physics to life at the submesoscale, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 14, Article L14602, DOI: 10.1029/2012gl052756.
19. Nakamura T., Matthews J. P., Awaji T., Mitsudera H., Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow, *J. Geophysical Research*, 2012, No. 117, Article C12014, DOI: 10.1029/2011JC007754.
20. Prants S. V., Budyansky M. V., Lobanov V. B., Sergeev A. F., Uleysky M. Y., Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trenceddies, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, Vol. 125, Article e2020JC016187, DOI: 10.1029/2020JC016187.
21. 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.