

Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам

А. В. Зимин^{1*}, Д. А. Романенков¹, А. А. Коник¹, О. А. Атаджанова^{1,2},
Е. И. Свергун¹, А. И. Варкентин^{1,3}, О. Б. Тепнин^{1,3}

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

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³ Камчатский филиал ФГНБУ «ВНИРО», Петропавловск-Камчатский, Россия

* e-mail: zimin2@mail.ru

Аннотация

Акватория шельфа и материкового склона Камчатского полуострова и северных Курильских островов со стороны Тихого океана является областью нереста и обитания некоторых видов промысловых рыб на ранних стадиях развития. Однако она остается недостаточно изученным районом океана с ограниченным набором данных наблюдений. Выполнен комплексный анализ разнородных спутниковых наблюдений и результатов расчетов по глобальной приливной модели за март – август 2015–2021 гг. Цель работы – получение новых сведений о пространственно-временной изменчивости характеристик разномасштабных вихревых структур и оценка влияния приливной динамики на некоторые особенности этой изменчивости. Используются следующие открытые архивы данных и атласы: *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Meta3.2 DT*, *MODIS-Terra/Aqua* и *VIIRS-Suomi NPP* (температура поверхности океана, концентрация хлорофилла *a*), радиолокационные изображения *Sentinel-1A/B*, ветер *NASA SMAP*, абсолютная динамическая топография *AVISO*, приливные течения *TPX09*, течения *CMEMS GLORYS12v1*. По результатам анализа оценены межгодовая и сезонная изменчивость частоты встречаемости и характеристик мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей и ее связь с вариациями Восточно-Камчатского течения и ветрового режима. Показан вклад прилива в вихревую динамику. В качестве примера рассмотрен случай проявления малых вихрей на периферии мезомасштабного антициклонического вихря в Авачинском заливе. Установлено, что взаимодействие антициклонической структуры с приливными течениями может служить самостоятельным механизмом генерации субмезомасштабных вихрей. Этот вывод может быть распространен для всего региона исследования, что представляется важным в понимании факторов, влияющих на выживание промысловых рыб на ранних стадиях развития.

© Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А.,
Свергун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: вихрь, альтиметрия, спутниковая радиолокация, оптический диапазон, мезомасштабные вихри, субмезомасштабные вихри, прилив, течения, завихренность, минтай, Тихий океан

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>.

Для цитирования: Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам / А. В. Зимин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 16–35. EDN VPBEOU.

Multiscale Eddies Dynamics in the Pacific Ocean Adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands

A. V. Zimin^{1*}, D. A. Romanenkov¹, A. A. Konik¹, O. A. Atadzhanova^{1,2},
E. I. Svergun¹, A. I. Varkentin^{1,3}, O. B. Tepnin^{1,3}

¹ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

³ Kamchatka Branch of VNIRO, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

* e-mail: zimin2@mail.ru

Abstract

The Pacific Ocean shelf and continental slope off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands are the area of spawning and early stages of life for some commercial fish species. However, it remains a poorly studied area with a limited set of observational data. In this paper, we perform a comprehensive analysis of heterogeneous satellite observations and global tidal model results over March–August 2015–2021. The work aims to obtain new information on the spatial and temporal variability of the characteristics of different-scale eddy structures and to assess the influence of tidal dynamics on some features of this variability. The following open data archives and atlases are used: Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Meta3.2 DT, Terra, Aqua /MODIS and VIIRS/Suomi NPP (ocean surface temperature, chlorophyll a), Sentinel-1A/B radar images, NASA SMAP wind, AVISO absolute dynamic topography, TPXO9 tidal currents, CMEMS GLORYS12v1 currents. The paper uses the analysis results to assess the interannual and seasonal variability of the incidence and characteristics of mesoscale and submesoscale eddies and its relation to variations in the East Kamchatka Current and wind regime. The contribution of the tide to the eddy dynamics is shown. As an example, we consider the case of manifestation of small eddies at the periphery of the mesoscale anticyclonic eddy in the Avacha Gulf. It is shown that the interaction of this anticyclonic structure with tidal currents can serve as an independent mechanism of submesoscale eddy generation. This finding can be extended to the entire study region, which appears to be important for understanding the factors affecting the survival of commercial fishes at early life stages.

Keywords: eddy, altimetry, radar, optical range, mesoscale eddies, submesoscale eddies, tide, currents, vorticity, pollock, Pacific Ocean

Acknowledgements: This work has been supported by the grants of the Russian Science Foundation № 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>.

For citation: Zimin, A.V., Romanenkov, D.A., Konik, A.A., Atadzhanova, O.A., Svergun, E.I., Varkentin, A.I. and Tepnin, O.B., 2024. Multiscale Eddies Dynamics in the Pacific Ocean Adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 16–35.

Введение

Акватория шельфа и материкового склона Камчатского полуострова и северных Курильских островов со стороны Тихого океана является областью массового нереста и обитания минтая (*Gadus chalcogrammus* Pallas) восточнокамчатской популяции на ранних стадиях развития. Икрометание минтая в рассматриваемом регионе начинается в марте и заканчивается в июне [1]. При этом выделяется два типа нереста: глубоководный и шельфовый [2–4]. Первый характерен для районов с глубинами 500–600 м – в вершинах глубоководных подводных каньонов, врезающихся в шельф Авачинского и Кроноцкого заливов. Второй отмечается в районах с глубинами 50–170 м и в основном характерен для юго-восточной оконечности Камчатки и северных Курильских островов [1]. Скопления молоди сосредоточены в районах нереста и обильны в южных частях заливов и на мелководье юго-восточного побережья Камчатки [5]. После выклева личинки поднимаются в подповерхностные горизонты [2], и необходимым условием их выживания на протяжении возрастной цепочки личинка – малек – сеголеток является развитие в шельфовой зоне [6, 7]. Поэтому исследование особенностей локальной динамики вод является одной из приоритетных задач при выяснении механизмов, влияющих на формирование урожайности поколений восточнокамчатского минтая.

Существенное влияние на изменчивость гидрологической структуры вод рассматриваемого региона оказывают холодное Восточно-Камчатское течение и связанные с ним вихревые структуры [8, 9]. В среднем в области шельфа и материкового склона полуострова перенос вод в приповерхностном слое направлен на юго-запад. В период нереста минтая скорость течения варьируется от 5 до 45 см/с [10]. При этом мезомасштабные вихри относительно быстро (со скоростью ~ 4–5 см/с) движутся, как правило, в том же направлении [11]. Мезомасштабные структуры в основном антициклонического типа размером 70–150 км хорошо прослеживаются в инфракрасном и видимом диапазонах и по данным спутниковых альтиметров [12, 13]. Их формирование обусловливается неустойчивостью потока основного течения, области генерации определяются особенностями топографии дна и береговой черты, а именно: крупными заливами и мысами на океаническом побережье полуострова. К таким заливам относится Авачинский залив, являющийся одним из основных мест нереста минтая [3] и преимущественно характеризующийся фоновой антициклонической циркуляцией [14, 15] вследствие влияния рельефа дна и неоднородностей береговой линии. В заливе часто наблюдаются определяемые по разным типам данных мезомасштабные вихри, влияющие на изменчивость характеристик водных масс и перемешивание биологически продуктивных прибрежных и океанских вод [10, 16]. В частности, такие образования могут обеспечивать поступление биогенных элементов в подповерхностный слой океана и определять уровень развития фитопланктона.

Отметим, что на периферии мезомасштабных структур по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в заливах Камчатского полуострова регистрируются группы вихревых структур размером преимущественно до 5 км [17, 18]. Вихри таких размеров относятся к субмезомасштабу, верхняя граница которого определяется характерной величиной внутреннего радиуса Россби. На акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, значение бароклинного радиуса Россби варьируется от 4 до 15 км [19]. Однако систематического обобщения сведений о частоте встречаемости малых (субмезомасштабных) вихрей и особенностях их генерации для данного района не было сделано. Субмезомасштабные вихри имеют широкое распространение в Мировом океане в целом [20] и могут играть значительную роль в интенсификации перемешивания, горизонтальном и вертикальном переносе тепла и вещества на локальных акваториях [21]. Механизмы, ответственные за генерацию малых вихрей, достаточно разнообразны [22] и включают в себя: бароклинно-баротропную неустойчивость в области течений и фронтальных зон; топографические эффекты при обтекании подводных гор, островов, полуостровов; пространственно-неоднородное ветровое воздействие; взаимодействие более крупных вихрей и их диссипацию; водообмен через проливы; приливную динамику. Их роль в развитии субмезомасштабной динамики вод на рассматриваемой акватории исследования пока не оценена, хотя в работе [23] отмечается важность приливных процессов с учетом особенностей их сизигийно-квадратурного цикла для области северных Курильских островов. Можно полагать, что интенсивная приливная динамика на рассматриваемой акватории, как и в арктических морях [21, 24], может являться ключевым фактором на масштабах от сотни метров до десятка километров и временном интервале от минут до суток, соответствующих субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрологических полей. Соответственно, вопрос о роли приливов в формировании особенностей субмезомасштабной динамики, которая может оказывать значительное влияние на выживаемость минтая на ранних стадиях развития в заливах Камчатского полуострова и прилегающей акватории северных Курильских островов, остается открытым, и это мотивирует данное исследование.

Цель настоящей работы – получение новых сведений о пространственно-временной изменчивости характеристик разномасштабных вихревых структур и оценка влияния приливной динамики на некоторые ее особенности на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, с марта по август (в период нереста и ранних стадий развития минтая) на основе обобщения многолетних архивов спутниковых данных с привлечением модельных расчетов приливных течений.

Материалы и методы

В качестве исходных данных для анализа мезомасштабных вихрей за период с марта по август 2015–2021 гг. в области, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам (рис. 1), использовалась ежесуточная информация о типе вращения, положении центра, радиусе каждого вихря. Данная информация была получена из архива *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product*

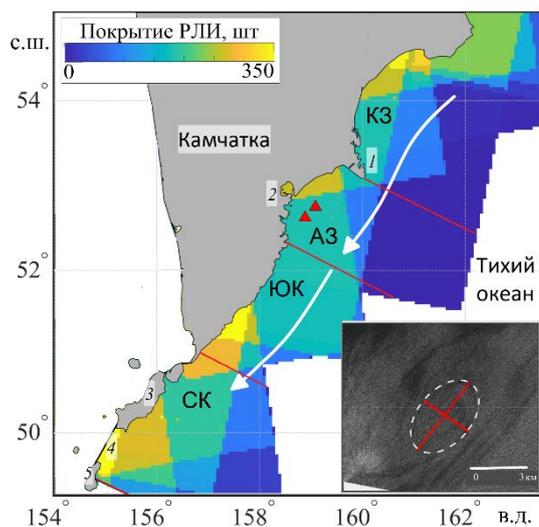


Рис. 1. Покрытие РЛИ за период с марта по август 2015–2021 гг.: 1 – м. Шипунский; 2 – Авачинская бухта; 3 – о. Парамушир; 4 – Четвертый Курильский пролив; 5 – о. Онекотан (треугольниками обозначены Северный и Южный глубоководные каньоны Авачинского залива; белыми стрелками показан основной поток Восточно-Камчатского течения). КЗ – Кроноцкий залив; АЗ – Авачинский залив; ЮК – Юго-Восточная Камчатка; СК – Северные Курилы. На врезке представлен пример проявления циклонической вихревой структуры на РЛИ в 19:57 (UTC) 16.07.2016; штриховая линия обозначает границу вихря, красные линии – его большой и малый диаметры

Fig. 1. Coverage of SAR-images between March and August for 2015–2021: K3 – Kronotsky Bay; A3 – Avacha Gulf; ЮК – South-eastern Kamchatka; СК – Northern Kuril Islands. 1 – Cape Shipunsky, 2 – Avacha Bay, 3 – Paramushir Island, 4 – Fourth Kuril Strait, 5 – Onkotan Island. The triangles indicate the Northern and Southern deep-water canyons in the Avacha Gulf. The white arrows show the main flow of the East Kamchatka Current. The inset shows an example of the manifestation of a cyclonic eddy structure on a SAR-image on 16 July 2016 at 19:57 UTC+0. The dashed line denotes the eddy boundary, the red lines are its large and small diameters

*Meta3.2 DT*¹⁾, в основе которого лежат данные о среднесуточных полях абсолютной динамической топографии продукта *AVISO* с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ по широте и долготе.

Дополнительно привлекались мгновенные спутниковые поля температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации хлорофилла *a* *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-Suomi NPP* уровня обработки *L2* с разрешением ~ 1 км (URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Всего использовалось 3160 полей за те сутки, когда регистрировались проявления мезомасштабных вихрей. Выбирались данные, которые имели индексы качества 0 (отличное) и 1 (хорошее) по результатам оценки алгоритма *Nearinfrared (NIR)* [25]. Поля интерполировались на сетку, соответствующую полям абсолютной динамической топографии продукта *AVISO*. Затем проводились оценки температуры и концентрации хлорофилла *a* в центре и на внешней границе мезомасштабного вихря, а также горизонтального градиента между ними.

В качестве исходных данных для регистрации поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей использовался многолетний архив радиолокационных изображений (РЛИ) высокого разрешения *Sentinel-1A/B* в *C*-диапазоне и режимах съемки *Interferometric Wide (IW)* с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км (URL: <https://search.asf.alaska.edu/>).

¹⁾ URL: <https://doi.org/10.24400/527896/a01-2022.005.YYMMDD> (дата обращения: 25.08.2024).

Всего было проанализировано 1405 покрывающих исследуемый регион изображений за период с марта по август 2015–2021 гг. Карта покрытия региона РЛИ представлена на рис. 1. Видна крайняя неравномерность в покрытии, однако в каждом из выделенных районов покрытие варьируется от 50–100 РЛИ над глубоководными районами до 300–350 РЛИ в прибрежных районах. В среднем покрытие составляет около 170 изображений.

В качестве поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей на РЛИ регистрировались структуры, образованные тонкими, закрученными в спирали или дуги темными или, наоборот, яркими светлыми полосами (на врезке рис. 1). Чаще всего структуры на снимках проявлялись за счет пленочного механизма, значительно реже отмечались вихри за счет ледового и сдвигово-волнового механизмов [26]. Как и в работах [24, 27], вихри детектировались по описанным выше проявлениям визуально, а их характеристики определялись по характеристикам эллипса, в который вписывалась структура. Определялись следующие характеристики: координаты центра, диаметр (как среднее между большим и малым диаметрами) и тип вращения. Спираль, закрученная против часовой стрелки, принималась за проявление вихря с циклоническим типом вращения, а закрученная по часовой стрелке – с антициклоническим.

Для анализа характеристик приводного ветра использовались средне-месячные данные скаттерометра *NASA SMAP*²⁾ (*Soil Moisture Active Passive*) с пространственным разрешением 0.25° по широте и долготе за период с марта по август 2015–2021 гг.

Поверхностные течения оценивались на основе среднемесячных данных о зональной и меридиональной составляющих продукта *GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS*³⁾ (сокр. *CMEMS GLORYS12v1*) для горизонтов 0–10 м за март – август 2015–2021 гг. Дополнительно использовались геострофические течения из альтиметрического продукта *AVISO* (URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00148>). Расчет фоновой относительной завихренности был выполнен аналогично работе [28].

Характеристики приливных течений оценивались по данным атласа *TPXO9* [29] с разрешением $1/30^\circ$ по широте и долготе. При помощи программного продукта *TMD* (URL: https://github.com/EarthAndSpaceResearch/TMD_Matlab_Toolbox_v2.5) для выбранных точек в четырех подрайонах, представленных на рис. 1, был предвычислен суммарный прилив по восьми основным гармоническим составляющим (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) за весь исследуемый период. Второстепенные (нелинейные и долгопериодные) гармоники не учитывались, так как особое внимание уделялось изменчивости характеристик течений внутри сизигийно-квадратурного цикла, равного половине лунного месяца. Для каждого из четырех подрайонов, указанных на рис. 1, использовались результаты расчета приливных течений в одной точке, которая располагалась над подписью подрайона. Отдельно на сетке $1/30^\circ$ выполнялся расчет поля приливных течений для Авачинского залива за 26.06.2018.

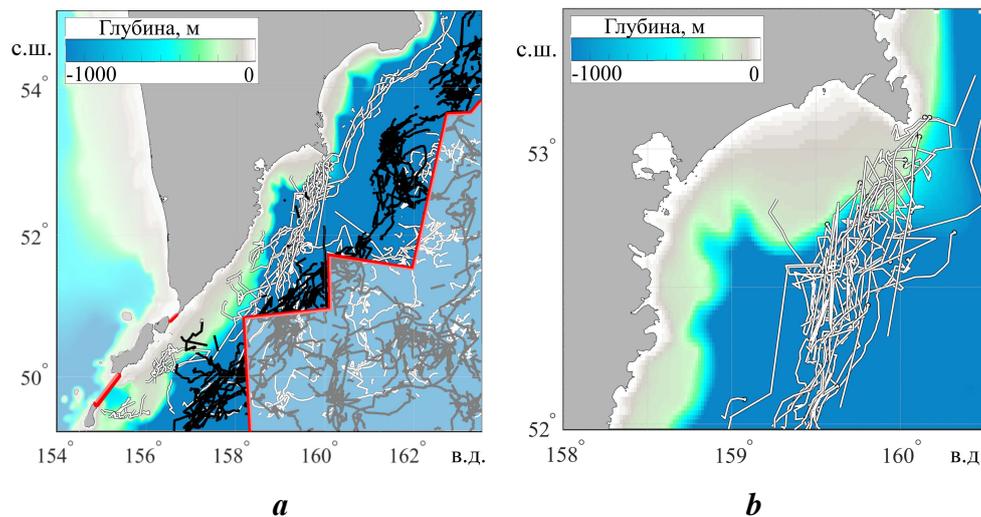
²⁾ URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 25.08.2024).

³⁾ URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Результаты

Мезомасштабные вихри. На акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, с марта по август 2015–2021 гг. было зарегистрировано 351 проявление мезомасштабных вихрей со средним диаметром 90 км. Среди структур отмечалось преобладание антициклонических вихрей (211) над циклоническими (140), при этом диаметры циклонов были в среднем больше, чем у антициклонов.

Пространственное распределение траекторий движения мезомасштабных вихрей за рассматриваемый период представлено на рис. 2, *a*. Большая часть вихрей обоих типов вращения (117 шт.) отмечается в районе Кроноцкого залива, при этом антициклонические вихри (60 шт.) чаще всего отмечались в Авачинском заливе. Их траектории движения представлены на рис. 2, *b*. Отметим, что при статистическом анализе учитывались только характеристики вихрей, попадающих в районы удовлетворительного покрытия акватории РЛИ (см. рис. 1). Однако в связи с ограничениями альтиметрических измерений вихри в непосредственной близости от берега не детектировались.

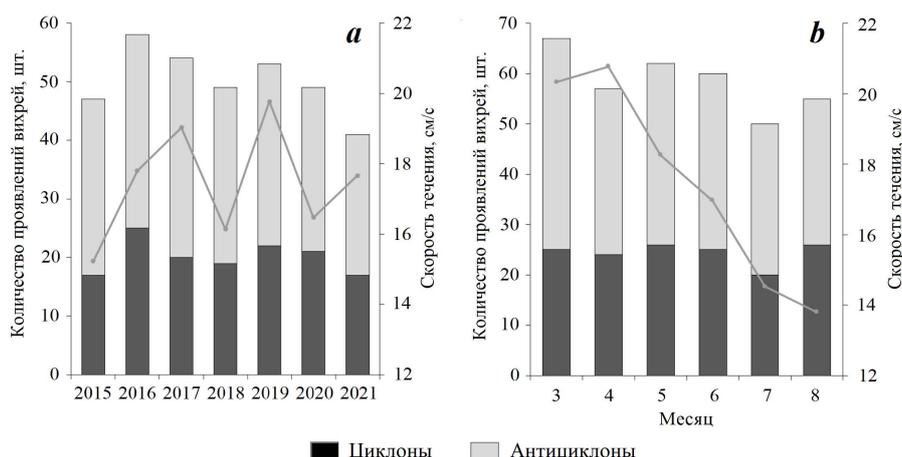


Р и с . 2 . Траектории движения мезомасштабных вихрей в районах, прилегающих к полуострову Камчатка и Курильским островам, за март – август 2015–2021 гг. (*a*) (черные линии – траектории движения циклонических структур, белые – антициклонических; красная ломаная линия ограничивает прибрежный район, соответствующий зоне удовлетворительного покрытия акватории РЛИ); треки антициклонических мезомасштабных вихрей вблизи Авачинского залива (*b*)

Fig. 2. Trajectories of mesoscale eddy movement in the areas adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands from March to August 2015–2021 (*a*): the black lines indicate the cyclonic structure trajectories; the white lines indicate the anticyclonic structure trajectories. The red broken line limits the coastal area corresponding to the zone of satisfactory coverage of SAR images; tracks of anticyclonic mesoscale eddies near the Avacha Gulf (*b*)

В рассматриваемой области большая часть мезомасштабных вихрей движется в юго-западном направлении, формируясь вследствие бароклинной неустойчивости [30] и взаимодействия основного потока Восточно-Камчатского течения с донной топографией и крупномасштабными неровностями береговой черты [9]. Подтверждается известная асимметрия в распределении циклонов и антициклонов относительно струи течения [9]. Вихревые структуры антициклонического типа в основном движутся ближе к берегу и существуют в среднем 21 день, циклонические структуры чаще встречаются мористее, а время жизни у них больше – 25 сут. К основным местам генерации антициклонических вихрей можно отнести Кроноцкий и Авачинские заливы, реже эти вихри возникают в шельфовых районах вблизи южной оконечности сильно выдающихся в океан мысов, у о. Онекотан и рядом с Четвертым Курильским проливом. Интенсивное вихревое движение в указанных областях может влиять на положение и структуру холодного и теплого промежуточного слоев [31] и формировать особенности распределения абиотических факторов среды, обуславливающих развитие икры и личинок минтая [3, 5].

В среднем в рассматриваемом районе с марта по август в каждый отдельный год наблюдается около 50 мезомасштабных вихревых структур (рис. 3, *a*) с диаметром 90 км. Межгодовая изменчивость их количества не превышает $\pm 20\%$, а среднего диаметра $\pm 10\%$. Аномальным по количеству вихрей является 2021 г. Камчатское течение в этот год, особенно в весенние месяцы, значительно отклонилось к юго-востоку от берега с образованием после прохождения м. Шипунского мощного антициклонического ринга на траверзе Авачинского залива [10]. В 2016 и 2017 гг., когда количество вихревых структур превышало среднее значение, Восточно-Камчатское течение было прижато к берегу, а его скорость была выше среднемноголетних значений или близка к ним.



Р и с. 3. Распределение количества мезомасштабных вихрей (столбики) и средняя скорость течений (серая линия) в верхнем слое, согласно данным реанализа *CMEMS*, по годам (*a*) и месяцам (*b*)

Fig. 3. Distribution of the number of mesoscale eddies and average velocity of currents (gray line) in the upper layer based on *CMEMS* reanalysis data by years (*a*) and months (*b*)

Анализ внутригодовой изменчивости показал (рис. 3, *b*), что максимальное число вихревых структур (65 шт.) регистрируется в марте, а минимальное (50 шт.) – в июле. Вероятно, наблюдаемый максимум проявлений связан с ослаблением Восточно-Камчатского течения из-за перестройки атмосферных процессов, обусловленных смещением положения Алеутского минимума [32, 33]. Это подтверждается также наблюдаемым по данным реанализа *CMEMS GLORYS12v1* сезонным изменением скорости течения в поверхностном слое с 21 см/с в апреле до 14 см/с в августе. Значительных сезонных тенденций в изменчивости средних диаметров вихрей не прослеживается (диаметры варьируются от 87 до 95 км за различные месяцы).

Обобщение данных о ТПО показало, что температура ядра мезомасштабных антициклонов в среднем составила 5.8 °С, а циклонических – 6.7 °С. Такое распределение, вероятно, связано с особенностями формирования мезомасштабных структур. В антициклонах, образующихся преимущественно в заливах Камчатского полуострова, захватываются и удерживаются холодные и распресненные шельфовые воды [11, 34]. В циклонах, формирующихся на восточной окраине пограничных течений, к которым относится и Восточно-Камчатское течение, захватываются и транспортируются теплые и соленые воды [35]. Рассчитанный среднемноголетний градиент температуры между центром и периферией для антициклонов составил 1.2 °С на 0.25°, а для циклонов – 0.7 °С на 0.25°. Максимальный градиент температуры на поверхности, связанный с вихрями, достигает 5 °С на 0.25°. Эти значения градиентов весьма значительны и сходны с оценками для фронтальных зон климатического происхождения [36]. Кроме того, на внешней границе мезомасштабных антициклонических вихрей, как правило, отмечаются значительные

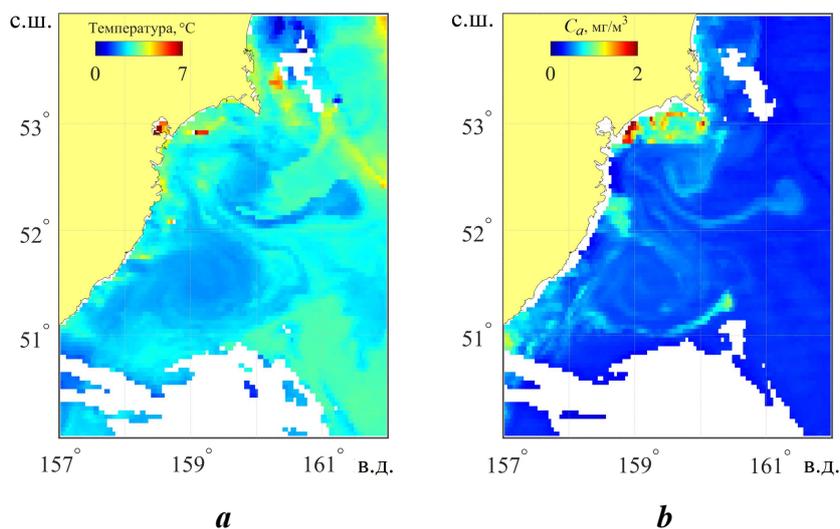


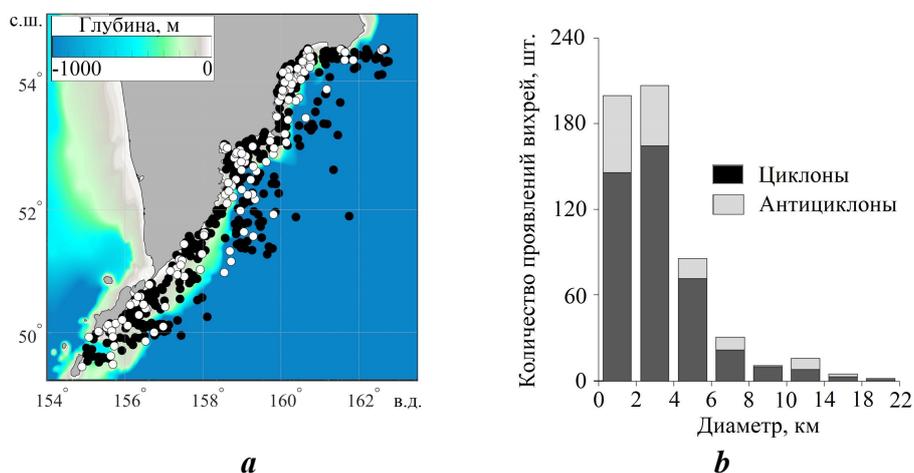
Рис. 4. Проявления антициклонических структур в поле ТПО (*a*) и концентрации хлорофилла *a* (*b*) по данным *MODIS-Aqua* 26 апреля 2017 г.

Fig. 4. Manifestations of anticyclonic structures in fields of sea surface temperature (*a*) and chlorophyll *a* (*b*) according to *MODIS* spectroradiometer data from the *Aqua* satellite on April 26, 2017

градиенты концентрации хлорофилла *a* (рис. 4, *b*), в среднем около 1.5 мг/м³ на 0.25°, что потенциально делает их областями с богатой кормовой базой, благоприятными для выживания минтая на ранних стадиях развития [16].

Субмезомасштабные вихри. В исследуемом районе за теплый период с 2015 по 2021 г. было зарегистрировано 559 поверхностных проявлений малых (субмезомасштабных) вихревых структур с диаметром от 300 м до 22.5 км при среднем значении 3.4 км. В целом вихревые структуры распространены по всему району (рис. 5, *a*), но концентрируются преимущественно в зоне шельфа и его прибрежной части. Наиболее частые проявления наблюдаются у берегов Кроноцкого залива и вблизи Авачинской бухты (чаще, чем на каждом пятом – шестом РЛИ), а также к юго-востоку от о. Парамушир (чаще, чем на каждом девятом – десятом РЛИ). Отмечается преобладание вихрей циклонического типа (428) над вихрями антициклонического типа (131). Средний диаметр у вихрей обоих типов был почти одинаковый – 3.6 км у циклонов и 3.4 км у антициклонов.

Среди циклонических проявлений чаще всего встречались вихри от 2 до 4 км (рис. 5, *b*) – около 40 % всех циклонов, а среди антициклонических – до 2 км – около 30 % всех антициклонов. При этом почти 3/4 всех проявлений вихрей имели диаметр до 4 км, что соответствует минимальному радиусу Россби в районе [19]. В основном вихри такого диаметра встречались преимущественно над шельфом или континентальным склоном; крупные субмезомасштабные вихри диаметром от 10 км (около 5 %) регистрировались всегда только над глубоководными районами.



Р и с . 5 . Пространственное распределение центров поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур за март – август 2015–2021 гг. (черными кругами обозначены циклонические, а белыми – антициклонические вихри) (*a*); количество вихрей в зависимости от диаметра и типа вращения (*b*)

Fig . 5 . Spatial distribution of centers of surface submesoscale eddy manifestations between March and August 2015–2021 (the black and white points indicate cyclonic and anticyclonic eddies, respectively) (*a*); the number of eddies depending on the diameter and type of rotation (*b*)

В 2015–2016 г. не отмечалось большого числа проявлений субмезомасштабных вихревых структур (менее 10 % от общего числа) вследствие низкой обеспеченности района снимками (рис. 6, *a*). В 2017 и 2020 гг. было зарегистрировано почти одинаковое количество проявлений. Вихри, как правило, регистрировались на шельфе, при этом в 2017 г. они чаще всего отмечались в Кроноцком заливе, в 2020 г. – в Авачинском и у о. Парамушир. В 2018 г. вихри чаще всего встречались в виде групп. Максимум встречаемости малых вихрей отмечался в 2019 году – 28 % от общего числа. Они почти равномерно были рассредоточены по шельфу, за исключением области около о. Парамушир. В 2021 г., несмотря на хорошую обеспеченность данными, субмезомасштабных вихрей детектировалось мало. Стоит отметить, что в этот год отмечается абсолютный минимум количества зарегистрированных мезомасштабных вихревых структур.

Переходя к описанию внутригодовой изменчивости субмезомасштабной активности, следует отметить, что ежемесячная обеспеченность данными за рассматриваемый период колебалась от 221 до 240 РЛИ. Минимальное количество проявлений малых вихрей регистрировалось в марте (рис. 6, *b*). Они отмечались только в виде единичных вихрей. В апреле по сравнению с мартом количество проявлений увеличивалось, они чаще встречались в шельфовых областях, особенно в Кроноцком заливе. В мае число вихрей росло, при этом максимальный рост отмечался в Авачинском заливе и у о. Парамушир. В июне было зарегистрировано почти 30 % от общего числа вихрей. Они регистрировались в основном группами. В июле число проявлений вихрей уменьшилось, при этом они отмечались преимущественно в Авачинском заливе.

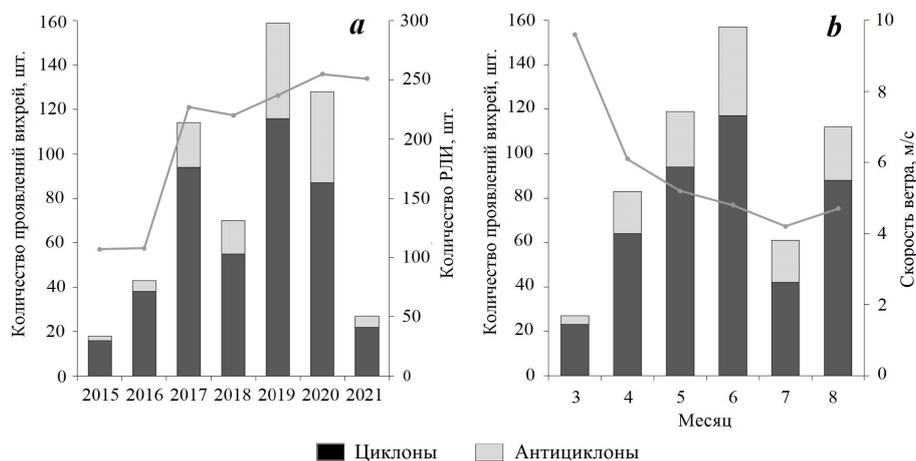


Рис. 6. Распределение количества зарегистрированных проявлений субмезомасштабных вихрей (столбики) и числа РЛИ (серая линия) по годам (*a*); внутригодовая изменчивость количества вихрей (столбики) и среднемесячной скорости приводного ветра (серая линия) (*b*)

Fig. 6. Distribution of the number of registered manifestations of submesoscale eddies (bars) and the number of radar images (gray line) by year (*a*); intra-annual variability of the number of eddies (bars) and the average monthly speed of the surface wind (gray line) (*b*)

В августе число вихрей опять возросло, они чаще отмечались над шельфом. Отметим, что минимальное число вихрей в марте может объясняться достаточно высокими скоростями ветра (рис. 6, *b*), которые могут приводить к их маскированию на РЛИ [37]. В другие месяцы средняя скорость ветра уменьшается до 5–6 м/с, и он не препятствует проявлению вихревых структур на РЛИ, хотя в июле отмечается еще один минимум количества субмезомасштабных вихрей.

Полученный значительный архив одномоментных проявлений субмезо- и мезомасштабных вихревых структур позволил рассмотреть их совместно. Предварительный анализ совпадающих по времени данных показал, что часто группы малых циклонических вихрей отмечались на периферии мезомасштабных антициклонов. Причины формирования вихрей весьма разнообразны и типичны для вихрей разных масштабов [11, 26]. Как указано в работе [26], вихревые структуры малых масштабов могут возникать вследствие локального ветрового воздействия, сдвиговой неустойчивости течений и фронтальной динамики, процессов распространения речных плюмов, а также топографических эффектов при обтекании неровностей берега и дна. Группирование субмезомасштабных вихрей может свидетельствовать о трансформации или даже разрушении более крупных вихрей. Роль приливной динамики в этом процессе – мало исследованное явление.

Разномасштабные вихри и приливная динамика. Как показал совокупный анализ спутниковых изображений, на внешней границе крупных вихрей интенсивное трение потоков не раз формировало большое число субмезомасштабных вихрей. Всего на основе полученных многолетних оценок было выделено 76 мезомасштабных вихрей, на внешней границе которых регистрировались малые вихри. Стоит отметить, что такая ситуация в большинстве случаев складывалась в период сизигийного усиления приливных течений. Результаты такого анализа с учетом приливной динамики представлены в таблице.

Из таблицы видно, что наибольшее число малых вихрей вблизи мезомасштабных структур наблюдалось в Авачинском заливе, а меньше всего – в акватории у юго-восточной оконечности Камчатки. До 60 % малых вихрей генерируется на периферии мезомасштабных структур в период сизигийного прилива. Как правило, на периферии мезомасштабных структур при максимальных скоростях приливного потока регистрировалось до 10 малых вихрей за сутки.

Учитывая промысловый интерес к району Авачинского залива, мы рассмотрели случай синхронной регистрации здесь вихрей разного масштаба, относящийся к 26 июня 2018 г. Прежде всего отметим, что за период с марта по август 2015–2021 гг. через Авачинский залив проходило 62 мезомасштабных антициклона с диаметрами от 60 до 156 км (см. рис. 2, *b*). Большая часть вихревых структур генерируется вблизи м. Шипунского, хаотично перемещаясь по восточной части Авачинского залива, и затем они диссипируют южнее 52° с. ш. при среднем времени жизни ~ 50 сут. Эти вихри часто «задерживаются» в заливе, очевидно попадая в область слабых скоростей Восточно-Камчатского течения. Вихри отчетливо прослеживаются в поле геострофических скоростей, рассчитанных по альтиметрическим данным (рис. 7, *a*).

Встречаемость малых вихрей в районах, прилегающих к п-ову Камчатка и Курильским о-вам с марта по август 2015–2021 гг.

Occurrence of small eddies in the areas adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands from March to August 2015–2021

Район / Area	Общее число СМВ / Total number of SME	В том числе / Including	
		на периферии МВ / at the ME periphery	из них в сизигийную фазу прилива / of them during the spring tide
КЗ / KG	189	80	40
АЗ / AG	131	117	77
ЮК / SEK	102	73	31
СК / NK	137	94	65

Примечание: Встречаемость оценивалась при количестве вихрей два и более. СМВ – субмезомасштабные вихри; МВ – мезомасштабные вихри; КЗ – Кроноцкий залив; АЗ – Авачинский залив; ЮК – Юго-Восточная Камчатка; СК – Северные Курилы (см. рис. 1).

Note: The occurrence was assessed if there were two or more eddies. SME – sub-mesoscale eddies; ME – mesoscale eddies; KG – Kronotsky Gulf; AG – Avacha Gulf; SEK – south-eastern Kamchatka; NK – the northern Kuril Islands (see Fig. 1)

Заметим также, что наличие мезомасштабного вихря на рис. 7, а не подтверждается данными реанализа *CMEMS GLORYS12v1*. В эти же сутки, 26.06.2018, по радиолокационным данным на периферии мезомасштабного вихря, в основном в его северо-западной части, было выявлено несколько субмезомасштабных вихрей со средним диаметром 1.5 км, которые обозначены точками на рис 7, а. Как следует из рис. 7, b, наблюдения приходятся на период за двое суток до максимального сизигийного прилива.

Чтобы прояснить роль приливной динамики, рассмотрим изменчивость завихренности суммарных течений в приливном цикле. Поле завихренности, соответствующее геострофическим течениям в мезомасштабном вихре на рис. 7, а, показано на рис. 7, с. Выбрав ближайшие моменты максимальных приливных и отливных течений, сложим их с течениями в мезовихре (считая их фоновыми), затем снова рассчитаем поля завихренности для этих двух моментов. Разность двух новых полей завихренности представлена на рис. 7, d, на котором можно видеть, что изменения суммарной завихренности, связанной с влиянием прилива, одного порядка с ее фоновыми значениями. Очевидно, что в северо-западной и северо-восточной частях мезомасштабного вихря при учете прилива возникает мелкомасштабная пространственная неоднородность поля течений, которая может быть источником генерации субмезомасштабных вихрей. Это является проявлением известного

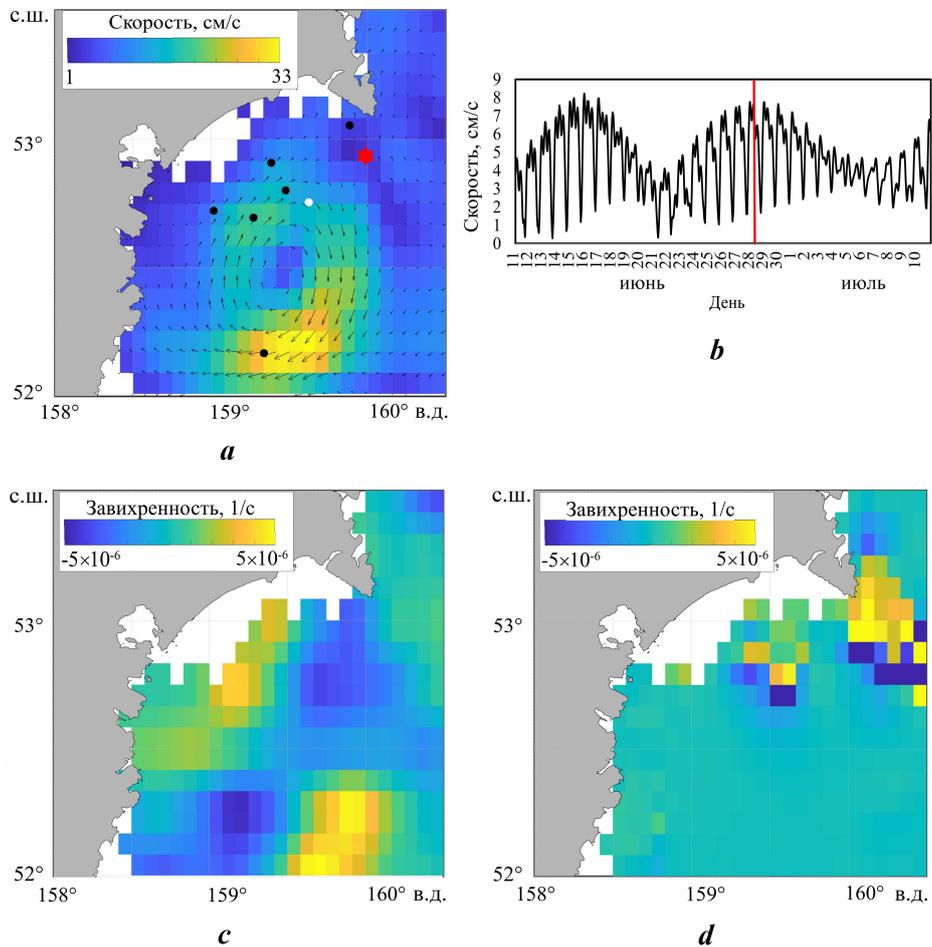


Рис. 7. Геострофическая циркуляция с положением центров проявлений субмезомасштабных вихрей за 26.06.2018 по данным РЛИ Sentinel-1 (красной звездой обозначена точка расчета приливных течений; черными кругами – циклонические, белыми – антициклонические субмезомасштабные вихревые структуры) (a); скорость приливных течений за 11.06.2018–10.07.2018 (красная линия обозначает время регистрации малых вихрей на РЛИ) (b); относительная завихренность геострофической циркуляции (c); разница полей суммарной завихренности в прилив (04:00) и отлив (16:00) в Авачинском заливе за 26.06.2018 (d). Геострофические течения были интерполированы на сетку приливной модели TPX09

Fig. 7. Geostrophic circulation on 26.06.2018 with the position of the centers submesoscale eddy manifestations from Sentinel-1 SAR data (the red star is the point of tidal current calculation; the black and white points indicate cyclonic and anticyclonic submesoscale eddy structures, respectively) (a); the magnitude of tidal currents for 11.06–10.07.2018 (the red line indicates the time when small eddies were recorded on the SAR image) (b); the relative curl of the geostrophic circulation (c); the difference of the fields of total curl at high tide (04:00) and low tide (16:00) in the Avacha Gulf on 26.06.2018 (d). The geostrophic currents were interpolated onto the TPX09 tidal model grid

каскадного процесса переноса завихренности по спектру масштабов от больших масштабов к малым [38]. Вышеприведенные рассуждения не учитывают нелинейное взаимодействие мезомасштабного вихря и прилива, не рассматриваются бароклинные эффекты или иные механизмы вихреобразования. Тем не менее представленный анализ вкуче с результатами таблицы дает основание рассматривать приливной фактор появления групп малых вихрей как вполне правдоподобный, тем более что почти все эти вихри наблюдаются вдали от берега над достаточно большими глубинами, что исключает влияние топографических эффектов. В квадратурную фазу приливных колебаний течения здесь как минимум в два раза слабее, соответственно влияние прилива уменьшается.

По данным о ТПО, в этот период температура ядра антициклона составляет $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как на внешней границе поверхностная температура достигает почти $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, большая часть малых вихрей регистрируется в области высокоградиентной термической зоны. Считается, что субмезомасштабные вихри способствуют более интенсивному вертикальному перемешиванию и адвекции, а это, в свою очередь, может влиять на особенности поверхностного распределения концентрации хлорофилла *a* в этой части Авачинского залива, что благоприятно для развития биоты. Такая особенность может наблюдаться даже в весенний период аналогично тому, как было представлено на рис. 4.

Завершая анализ частного случая 26.06.2018, отметим еще одно обстоятельство. Величины приливных течений в Авачинском заливе изменяются в широких пределах. К югу от мыса Шипунский они сопоставимы с фоновыми течениями и даже превышают их. Однако в близкие к обсуждаемому примеру даты малые вихри здесь не регистрировались в связи с отсутствием покрытия РЛИ данной части Авачинского залива.

Заключение

В данной работе представлен анализ разнородных спутниковых наблюдений над акваторией Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам. Такой комплексный обзор спутниковых данных за длительный период (семь лет) в регионе выполнен впервые. Анализ показал, что вихревая динамика на разных масштабах подвержена межгодовой и внутригодовой изменчивости в частоте и местах встречаемости вихревых образований, и – в меньшей степени – в их размерах и типе вращения. Особенности изменчивости мезомасштабных вихрей связаны с поведением Восточно-Камчатского течения, в значительной мере определяемым атмосферными процессами на межгодовом и синоптическом масштабах. По данным спутниковых наблюдений и литературным источникам, в Авачинском и Кроноцком заливах, а также на шельфе юго-востока Камчатки это обуславливает изменчивость характеристик водных масс и динамику их границ, что влияет на жизненные циклы разнообразных гидробионтов, включая ранние стадии развития минтая.

Выявлены общие тенденции в межгодовой изменчивости субмезомасштабных и мезомасштабных вихрей. Показано, что внутригодовая изменчивость характеристик разномасштабных вихрей зависит от особенностей сезонных колебаний Восточно-Камчатского течения и ветрового режима.

Взаимосвязь вихрей разного масштаба может быть примером теоретически описанного прямого каскада передачи энергии в океане. В нашем исследовании показано, что приливной фактор может быть доминирующей причиной появления групп малых вихрей на периферии более крупных мезомасштабных вихрей в условиях, когда топографические эффекты не должны быть существенными. Это происходит вследствие нестационарных сдвигов скорости течений под влиянием приливных течений. Такой процесс гипотетически может не только приводить к разрушению мезомасштабного вихря, но и влиять на особенности вертикального и горизонтального распределения икры и личинок минтая, поскольку на частном примере Авачинского залива показано, что группы малых вихрей появляются в районе его массового нереста и развития личинок. Данные о температуре поверхности океана и концентрации хлорофилла в этом же районе указывают, что малые вихри могут влиять на развитие кормовой базы, а это критически важно для ранних стадий развития рыб. Натурные наблюдения для описания этих процессов крайне желательны.

Наконец, отметим, что результаты глобального широко используемого реанализа океана *CMEMS GLORYS12v1* не отражают многих особенностей разномасштабной вихревой динамики в регионе, в частности не показывают наблюдаемую картину мезомасштабных вихрей в Авачинском заливе. Это подтверждает необходимость развития и усовершенствования моделей высокого разрешения для данного региона, что мотивирует дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буслов А. В., Тепнин О. Б. Характеристика нереста минтая у северных Курильских островов и юго-восточной оконечности Камчатки // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2007. № 9. С. 235–245. EDN JMETCT.
2. Буслов А. В., Тепнин О. Б. Условия нереста и эмбриогенеза минтая *Theragra chalcogramma* (*Gadidae*) в глубоководных каньонах тихоокеанского побережья Камчатки // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42, № 5. С. 617–625.
3. Буслов А. В., Тепнин О. Б., Дубина А. Ю. Особенности экологии нереста и эмбриогенеза восточнокамчатского минтая // Известия ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 282–298. EDN HPMOYH.
4. Сергеева Н. П. Интенсивность нереста минтая в Кроноцком заливе (Восточная Камчатка) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей (Петропавловск-Камчатский, 12–13 ноября 2019 года) : материалы XX Международной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика РАН В. Л. Комарова. Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2019. С. 177–182. EDN LFGKTL.
5. 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. // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 105–119. EDN HQAYWV. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>
6. Минтай в экосистемах дальневосточных морей / В. П. Шунтов [и др.]. Владивосток : Изд-во ТИНРО, 1993. 426 с.
7. Brodeur R. D., Matthew T. W. A review of the distribution, ecology and population dynamics of age-0 walleye pollock in the Gulf of Alaska // Fisheries Oceanography. 1996. Vol. 5, iss. S1. P. 148–166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1996.tb00089.x>

8. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. X. Берингово море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1999. 301 с.
9. *Рогачев К. А., Шлык Н. В.* Характеристики вихрей Камчатского течения // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 70–79. EDN TQTLGT.
10. *Тепнин О. Б.* Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93. EDN WPQKWL. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
11. *Пранц С. В.* Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 387–400. EDN ESTQDT. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040106>
12. *Вакульская Н. М., Дубина В. А., Плотников В. В.* Вихревая структура Восточно-Камчатского течения по спутниковым наблюдениям // Физика геосфер : сборник научных статей по избранным материалам XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток : Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2019. С. 73–81. <https://doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007>
13. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka Trench eddies / S. V. Prants [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125, iss. 6. e2020JC016187. <https://doi.org/10.1029/2020JC016187>
14. Detection and analysis of the causes of intensive harmful algal bloom in Kamchatka based on satellite data / V. Bondur [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1092. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
15. Methodology and results of satellite monitoring of Karenia microalgae blooms, that caused the ecological disaster off Kamchatka Peninsula / A. Alexanin [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 5. 1197. <https://doi.org/10.3390/rs15051197>
16. Влияние абиотических факторов на распределение минтая на ранних этапах жизненного цикла на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка / А. А. Коник [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU-2023) (Москва, 23–27 октября 2023 года) : труды XII Международной научно-практической конференции. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2024. Т. II (IV). С. 308–318.
17. *Круглова К. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А.* Сравнительный анализ характеристик поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Курило-Камчатском регионе летом 2020 и 2021 годов // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования (Калининград, 18–24 апреля 2022 года) : сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2022. С. 123–125.
18. Малые вихревые структуры Берингова моря и шельфа Курило-Камчатского региона по данным спутниковой радиолокации за теплый период 2020–2021 гг. / А. В. Зимин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 239–249. EDN IQUPQI. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-239-249>
19. Comparative analysis of the first baroclinic Rossby radius in the Baltic, Black, Okhotsk, and Mediterranean seas / A. Kurkin [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. Vol. 20, iss. 4. ES4008. <https://doi.org/10.2205/2020ES000737>
20. *Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime / Edited by M. W. Hecht and H. Hasumi. Washington : AGU, 2008. P. 17–38. <https://doi.org/10.1029/177GM04>

21. *Зимин А. В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. Москва : ГЕОС, 2018. 220 с.
22. The occurrence, variability, and potential drivers of submesoscale eddies in the Southern California Bight based on a decade of high-frequency radar observations / A. R. Payandeh [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2023. Vol. 128, iss. 10. e2023JC019914. <https://doi.org/10.1029/2023JC019914>
23. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow / T. Nakamura [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C12. C12014. <https://doi.org/10.1029/2011jc007754>
24. *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, iss. 3. P. 36–45. EDN GJYYMB. <https://doi.org/10.7868/S2073667319030055>
25. *Goyens C., Jamet C., Schroeder T.* Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 131. P. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.006>
26. *Каримова С. С.* Сезонная и межгодовая изменчивость субмезомасштабной вихревой активности в Балтийском, Черном и Каспийском морях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 4. С. 173–185. EDN PESYIF.
27. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data / I. L. Bashmachnikov [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 7. e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
28. *Белоненко Т. В., Шоленинова П. В.* Об идентификации синоптических вихрей по спутниковым данным на примере акватории северо-западной части Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 5. С. 79–90. EDN XAEWOB. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-79-90>
29. *Egbert G. D., Erofeeva S. Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19, iss. 2. P. 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2)
30. *Жабин И. А., Дмитриева Е. В., Таранова С. Н.* Мезомасштабные вихри в Беринговом море по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 5. С. 46–65. EDN EZGARF. <https://doi.org/10.31857/S0205961421050109>
31. *Жабин И. А.* Эволюция вихря Восточно-Камчатского течения по данным спутниковых наблюдений // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 1. С. 53–58. EDN НТРММТ.
32. *Шлык Н. В., Рогачев К. А.* Быстрое опреснение Камчатского течения // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2016. № 5. С. 113–119. EDN ХНОЕIX.
33. *Хен Г. В., Заочный А. Н.* Изменчивость расхода Камчатского течения и океанологических параметров в Камчатском проливе // *Известия ТИНРО*. 2009. Т. 158. С. 247–260. EDN KYMWQP.
34. *Булатов Н. В., Самко Е. В.* Основные черты структуры фронтальных зон северо-западной части Тихого океана // *Известия ТИНРО*. 2002. Т. 130, ч. 1. С. 12–23. EDN HSKZJZ.

35. Кубряков А. А., Белоненко Т. В., Станичный С. В. Влияние синоптических вихрей на температуру морской поверхности в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 34–43. EDN VVYAOT. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43>
36. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
37. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. Москва : ИКИ РАН, 2011. 470 с.
38. Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость Мирового океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 362 с.

Поступила 13.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 7.06.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Зимин Алексей Вадимович, руководитель лаборатории, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук, **SPIN-код: 9833-3460**, **WoS ResearcherID: C-5885-2014**, **Scopus Author ID: 55032301400**, zimin2@mail.ru

Романенков Дмитрий Анатольевич, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **WoS ResearcherID: U-8280-2017**, **SPIN-код: 4872-3349**, **Scopus Author ID: 6506855768**, dmromanenkov@yandex.ru

Коник Александр Александрович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30); кандидат географических наук, **WoS ResearcherID: AAB-7195-2020**, **SPIN-код: 5839-1738**, **ORCID ID: 0000-0002-2089-158X**, **Scopus Author ID: 57203864647**, konikrshu@gmail.com

Атаджанова Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5016-2970**, **WoS ResearcherID: R-7835-2018**, **Scopus Author ID: 57188718743**, oksanam07@list.ru

Свергун Егор Игоревич, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3212-7041**, **WoS ResearcherID: AAC-7289-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-9228-5765**, **Scopus Author ID: 57195066881**, egor-svergun@yandex.ru

Варкентин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), заместитель руководителя Камчатского филиала ФГБНУ «ВНИРО» (683000, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, д. 18), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 6126-6033**, a.varkentin@kamniro.vniro.ru

Тепнин Олег Борисович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), заведующий сектором океанографии, Камчатский филиал ФГБНУ «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» («КамчатНИРО»), 683000, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18), **SPIN-код: 4002-1975**, **ORCID ID: 0000-0001-9596-4336**, **WoS ResearcherID: KIL-1378-2024**, tenpin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Зимин Алексей Вадимович – концепция статьи, комплексный анализ и интерпретация результатов, окончательная версия рукописи

Романенков Дмитрий Анатольевич – анализ и интерпретация данных по разделу «Разномасштабные вихри», весомые правки при пересмотре версий рукописи

Коник Александр Александрович – анализ и интерпретация данных по разделам «Мезомасштабные вихри» и «Разномасштабные вихри и приливная динамика», работа над черновой версией рукописи

Атаджанова Оксана Алишеровна – анализ и интерпретация данных по разделу «Субмезомасштабные вихри», создание черновой версии рукописи

Свергун Егор Игоревич – работа с данными по разделу «Разномасштабные вихри и приливная динамика», работа над черновой версией рукописи

Варкентин Александр Иванович – комплексная интерпретация результатов, работа над черновой версией рукописи

Тепнин Олег Борисович – комплексный анализ данных, работа над черновой версией рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи