

Использование спутниковой альтиметрии для изучения мезомасштабных вихрей и прибрежных волновых процессов у побережья Камчатки

С. П. Худякова^{1,3}, Т. В. Белоненко¹, А. В. Кочнев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: khydyakova.s@gmail.com

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Архангельск, 163002, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия

Рассмотрена роль мезомасштабных вихрей в формировании прибрежной динамики восточного побережья Камчатки. Особое внимание уделено зоне Камчатского пролива, где наблюдается высокая вихревая активность. Установлено, что антициклонические и циклонические структуры формируются в различных зонах Восточно-Камчатского течения, демонстрируя пространственную асимметрию: антициклоны локализуются ближе к берегу, а циклоны — у бровки материкового склона. Анализ спутниковых и модельных данных (META3.2 и GLORYS12V1) показал, что мезомасштабные вихри играют ключевую роль в сезонной и межгодовой изменчивости расхода воды, переноса тепла и соли, в первую очередь обеспечивая южный перенос вод из Берингова моря в северо-западную часть Тихого океана. Учитывая, что по результатам теоретических исследований мезомасштабные вихри способны инициировать низкочастотные возмущения, включая шельфовые и внутренние волны Кельвина, полученные оценки их пространственно-временных характеристик в районе Камчатского пролива — радиуса порядка 70–80 км и скорости дрейфа 10–13 см/с — позволяют отнести эти структуры к потенциальным генераторам прибрежных и планетарных волн, соизмеримым с ними по масштабам. Таким образом, полученные результаты подчёркивают значимость мезомасштабных вихрей не только как активных участников водообмена, но и как чувствительных индикаторов крупномасштабной океанической динамики, способных служить эффективным инструментом диагностики низкочастотной изменчивости в сложных и слабо изученных прибрежных районах.

Ключевые слова: спутниковые данные, альтиметрия, мезомасштабные вихри, Камчатский пролив, планетарные волны, волны Кельвина, шельфовые волны, вихревая динамика, META3.2, GLORYS12V1

Одобрена к печати: 09.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-298-311

Введение

Восточное побережье Камчатки представляет собой уникальный регион взаимодействия океанических и прибрежных процессов, где динамика прибрежных вод определяется как локальными условиями, так и воздействием крупномасштабной циркуляции северной части Тихого океана. Одним из ключевых элементов этой циркуляции является Восточно-Камчатское течение — холодное западное пограничное течение, проходящее вдоль континентального склона и шельфа восточной Камчатки. Несмотря на существенную межгодовую изменчивость (Рогачев, Шлык, 2006), течение формируется преимущественно за счёт вод, поступающих из Берингова моря в южном направлении, так как средний перенос вод через Камчатский пролив отрицателен (Kinney, Maslowski, 2012). Показано, что концентрация растворённого кислорода в промежуточном слое Охотского моря зависит от переноса Восточно-Камчатским течением, Ойясио и Восточно-Сахалинским течением (Andreev, Shevchenko, 2008).

По данным А. Андреева и И. Пипко (Andreev, Pipko, 2022), в зимний период в зоне Восточно-Камчатского течения формируются два типа поверхностных вод — холодные и менее солёные воды, поступающие с северного шельфа Берингова моря, и относительно более тёплые и солёные воды с глубоководной части Берингова моря. Эти водные массы переносятся в Восточно-Камчатском течении преимущественно под действием восточных и северо-восточных ветров. А вихри, вовлекающие в своё ядро холодные и опреснённые воды Берингова моря, переносят эти воды в южные районы вдоль побережья Камчатки. Как показали измерения, проведённые летом 2018 г., на содержание биогенных элементов в зоне Восточно-Камчатского течения оказывает влияние циркуляция промежуточных вод западного субарктического круговорота, а также осадочные потоки растворённого кремния и железа (Nishioka et al., 2021).

Камчатский пролив, расположенный между полуостровом Камчатка и островом Беринга, представляет собой самый западный и наиболее глубоководный пролив в системе Алеутских островов (рис. 1). Он служит важным звеном в системе водообмена между северной частью Тихого океана и Беринговым морем, обеспечивая южный перенос вод, циркулирующих в пределах субарктического циклонического кольца. Гидродинамические процессы в районе Камчатского пролива формируются под воздействием множества факторов, включая интенсивный атмосферный форсинг, обусловленный как сезонными (Азиатский антициклон, Алеутская депрессия), так и межгодовыми изменениями циркуляции, частым прохождением глубоких циклонов, а также высоким уровнем сейсмической активности региона. Кроме того, регион подвержен цунами-воздействиям, что придаёт дополнительную нестабильность прибрежной и проливной гидродинамике (Власова и др., 2022).

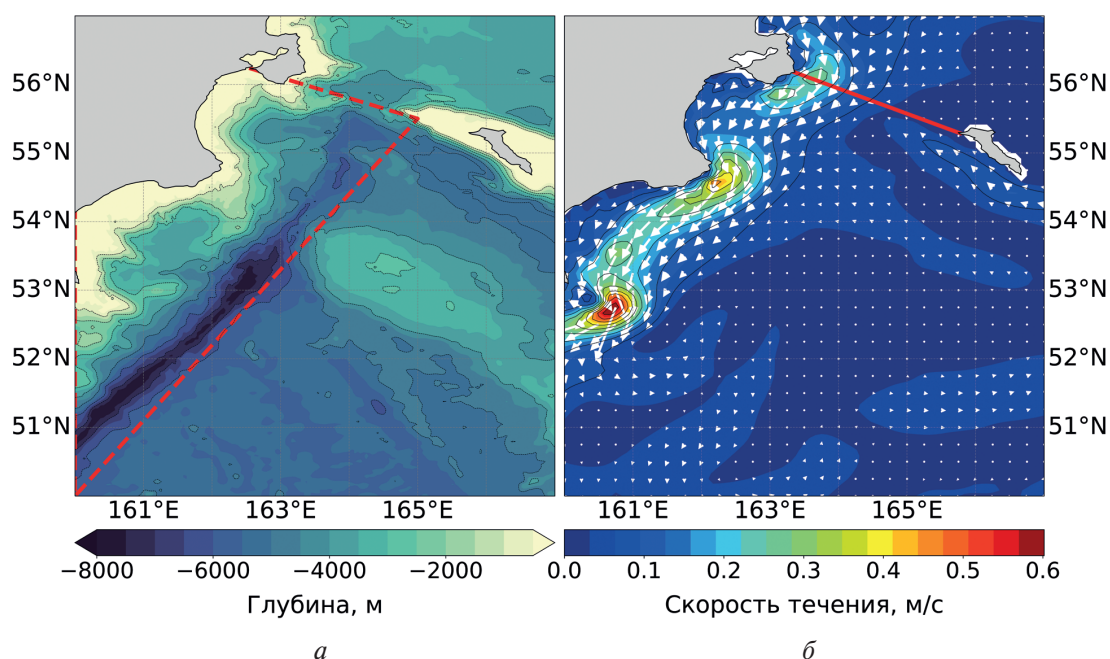


Рис. 1. Донная топография по данным GEBCO_2021 (а), красной штриховой линией отмечен район исследуемых вихрей. Скорость течения на поверхности, осреднённая за период 1993–2021 гг. по данным GLORYS12V1 (б), красной линией указан Камчатский пролив

Роль вихрей в переносе свойств вод не ограничивается поверхностным слоем. Согласно К. А. Рогачёву и Н. В. Шлык (Rogachev, Shlyk, 2018, 2021, 2025), в последние десятилетия зафиксировано устойчивое потепление галоклина в Восточно-Камчатском течении и изменение его структуры. Эти изменения частично объясняются усилением переноса тёплой и солёной воды алеутскими вихрями. Напротив, камчатские вихри характеризуются холодным и малосолёным ядром и диаметром 100–120 км, толщиной слоя галоклина до 100 м и макси-

мальными скоростями до 1 м/с вблизи поверхности (Rogachev, Shlyk, 2019; Solomon, Ahlnäs, 1978). Их вклад в общий перенос массы достигает 10 Мт/с, что сопоставимо с геострофическим потоком самого Восточно-Камчатского течения (Рогачёв, Горин, 2004).

Долгосрочные тренды температуры и солёности в ядрах вихрей, наблюдаемые по данным Argo и спутников (Rogachev, Shlyk, 2021), также подтверждают значимость вихрей как индикаторов климатической изменчивости. Например, за период с 2012 по 2018 г. температура в галоклине Восточно-Камчатского течения повысилась на $\sim 3^\circ\text{C}$, а солёность, напротив, снизилась. Эти изменения связаны с рекордным снижением ледяного покрова Берингова моря и усилением переноса тёплых вод алеутскими вихрями. Характеристика вихрей Камчатского течения в тёплые и холодные годы демонстрирует их чувствительность к атмосферным условиям (Rogachev, Shlyk, 2025).

Двигаясь на юг вдоль береговой границы, Восточно-Камчатское течение взаимодействует со сложным рельефом шельфа и материкового склона, создавая условия для формирования устойчивых фронтов, мезомасштабных вихрей и зон апвеллинга. Эти процессы оказывают влияние на вертикальный и горизонтальный перенос массы, тепла и биогенных элементов, а также создают условия для генерации и распространения различных типов прибрежных волн, включая шельфовые и внутренние волны Кельвина (Белоненко и др., 2004, 2016, 2018, 2024; Гневышев и др., 2019, 2021, 2023а, б; Сандалюк и др., 2020; Травкин и др., 2022). Такие волны К. Хассельман называет «смешанными топографо-планетарными волнами» (Hasselmann, 1982; LeBlond, Mysak, 1981).

В современной океанологии всё более заметной становится тенденция к косвенному анализу распространения волн Россби. Такой подход основан на понимании того, что мезомасштабные вихри, обладая способностью к длительному существованию и перемещению на большие расстояния, могут служить своеобразными индикаторами или носителями сигналов волн Россби. Наблюдаемые траектории этих вихрей, особенно их зональные и меридиональные смещения, нередко коррелируют с теоретически предсказанными фазовыми или групповыми скоростями соответствующих волн. Подобная методология предоставляет возможность исследовать сложную динамику планетарных волн даже в условиях ограниченности прямых наблюдений или в случаях, когда традиционные методы идентификации волн Россби затруднены из-за наложения других динамических процессов. В результате мезомасштабные вихри становятся важным инструментом в изучении крупномасштабной океанической циркуляции и её сложной связи с волновыми явлениями (Белоненко, Кубряков, 2014; Белоненко, Фролова, 2019; Белоненко и др., 2016; Гневышев, Белоненко, 2023; Belonenko et al., 2018; Fedorov, Belonenko, 2020; Gnevyshev et al., 2019, 2021).

Генерация шельфовых волн возможна при наличии характерного рельефа дна, когда материковый шельф функционирует как волновод, обеспечивая условия для эффективной передачи энергии с минимальными диссипативными потерями. Важнейшую роль здесь играет плавный наклон дна и ограниченность глубины в направлении от берега к открытому океану. Для возбуждения волн Кельвина, в свою очередь, необходимо наличие чёткой береговой границы, вдоль которой такие волны могут распространяться (Белоненко и др., 2004; Gill, 1982). В стратифицированном океане с постоянной глубиной волны Кельвина могут существовать в виде внутренних волн, распространяющихся вдоль берега с характерным поперечным масштабом, сравнимым с бароклинным радиусом деформации Россби. Эти волны являются нерассеянными и обладают строгой направленностью распространения, обусловленной вращением Земли (Гневышев и др., 2021, 2023б).

Однако в реальных океанических условиях стратификация водной толщи и переменный рельеф дна действуют совместно, что приводит к формированию более сложных волновых структур, обладающих признаками как шельфовых волн, так и волн Кельвина. Такие возмущения принято считать гибридными топографическими волнами (Gill, 1982). Их изучение особенно актуально для регионов с развитым шельфом, значительной стратификацией и сложной береговой линией, как, например, у восточного побережья Камчатки. Несмотря на важность региона, численных и наблюдательных исследований, посвящённых шельфовым волнам у берегов Камчатки, на сегодняшний день сравнительно немного.

Цель настоящей работы — проанализировать характер распространения мезомасштабных вихрей у восточного побережья Камчатки. Полученные результаты позволят уточнить роль вихревых структур в динамике низкочастотных процессов, а также их вклад в энергетику и структуру прибрежных возмущений, наблюдаемых в этом малоизученном, но физически сложном регионе.

Используемые данные

В настоящем исследовании применяется продукт «Атлас траекторий мезомасштабных вихрей» (**META3.2 DT allsat**), предоставляемый AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>). Продукт основан на использовании альтиметрической информации (высоты поверхности моря) для идентификации и отслеживания траекторий циклонов и антициклонов в Мировом океане (Pegliasco et al., 2022). Алгоритм идентифицирует изолированные вихри на ежедневных картах и отслеживает их, фиксируя их эволюцию во времени. Атлас присваивает каждому вихрю уникальный идентификационный номер и координаты его траектории. Продукт META3.2 содержит информацию о типе вихрей, их радиусе, амплитуде, орбитальной скорости и времени жизни.

Используются данные **GLORYS12V1** (англ. Global Ocean Physics Reanalysis), доступные на портале CMEMS (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service), <https://doi.org/10.48670/moi-00021>. Продукт GLORYS12V1 представляет собой вихреразрешающий реанализ Мирового океана с пространственным разрешением $1/12^\circ$ на 50 уровнях и охватывает период альтиметрических наблюдений с 1993 г. по настоящее время. Реанализ основан на гидродинамической модели циркуляции океана NEMO (англ. Nucleus for European Modelling of the Ocean). Продукт ассимилирует данные спутниковых альтиметров (аномалии уровня моря), температуры поверхности моря, сплочённости морского льда, а также вертикальные профили температуры и солёности. Наблюдения усваиваются с помощью фильтра Калмана пониженного порядка.

Для описания рельефа дна в настоящем исследовании использовалась глобальная цифровая модель **GEBCO** (англ. General Bathymetric Chart of the Oceans) (https://www.gebco.net/data_and_products/). Модель GEBCO разработана с целью повышения точности и доступности данных о морском дне и охватывает практически весь Мировой океан, включая районы между 60° с. ш. и 50° ю. ш. Современная версия продукта основана на объединении результатов эхолотационных измерений, спутниковой альтиметрии и интерполяции данных, что обеспечивает высокую степень детализации. Пространственное разрешение данных составляет ~ 450 м (15 угл. с).

Результаты

Генерация и пути распространения мезомасштабных вихрей восточного побережья Камчатки

Анализ траекторий мезомасштабных вихрей, представленных на *рис. 2* и *3* (см. с. 302), позволяет выявить, что основные зоны их генерации локализуются в северной части исследуемого региона, в акватории юго-западного сектора Берингова моря. Пространственное распределение траекторий указывает на преобладающее развитие и дальнейшее продвижение вихревых структур в прибрежной зоне вдоль материкового склона и шельфа восточного побережья Камчатки.

Мы сосредоточим внимание на долгоживущих вихрях, жизненный цикл которых превышает 90 и 180 сут, поскольку именно такие структуры обладают наибольшим потенциалом для взаимодействия с крупномасштабной циркуляцией и волновыми процессами, включая генерацию и модуляцию топографически захваченных волн. Долговременное существование и пространственная устойчивость подобных вихрей позволяют рассматривать их как

важные элементы в системе прибрежной динамики, способные как к горизонтальному переносу массы и энергии, так и к возбуждению локальных низкочастотных возмущений вблизи континентального склона.

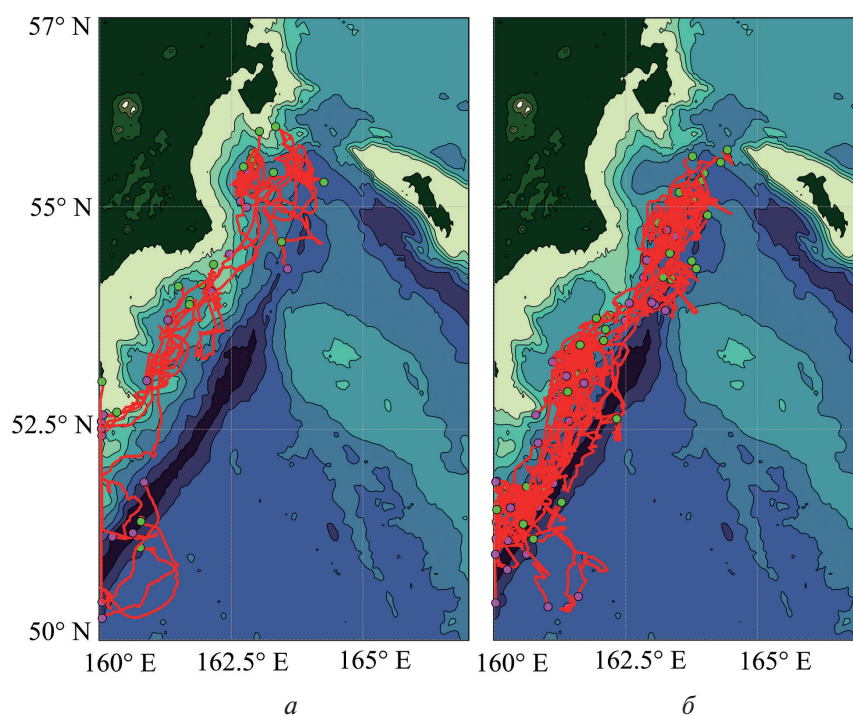


Рис. 2. Траектории антициклонических (а) и циклонических (б) мезомасштабных вихрей с периодом жизни более 90 сут по данным МЕТА3.2 DT за период 1993–2021 гг. Зелёными точками показаны места генерации, сиреневыми — места диссипации вихрей

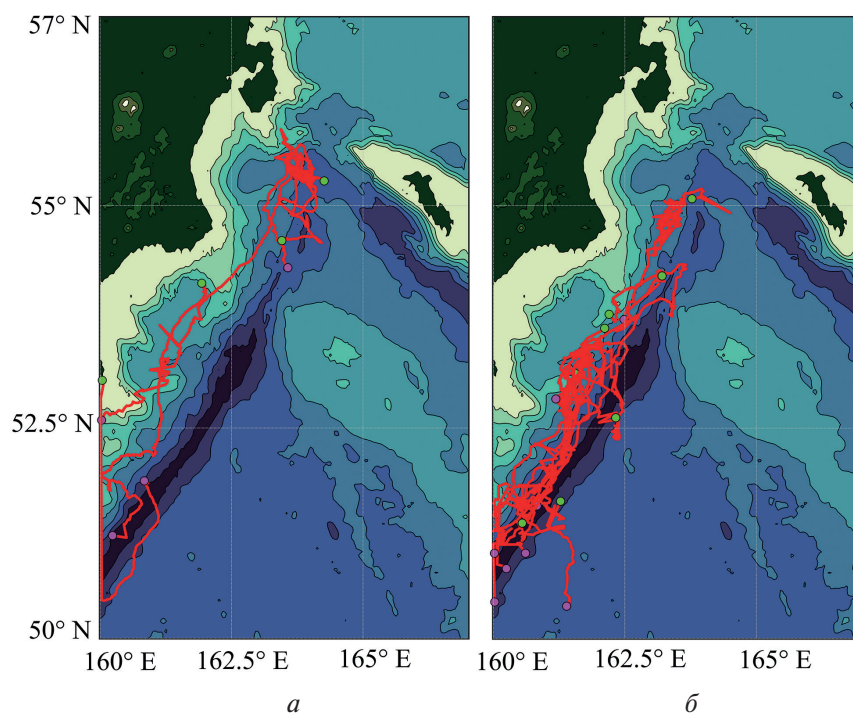


Рис. 3. Траектории антициклонических (а) и циклонических (б) мезомасштабных вихрей с периодом жизни более 180 сут по данным МЕТА3.2 DT за период 1993–2021 гг. Зелёными точками показаны места генерации, сиреневыми — места диссипации вихрей

Сравнительный анализ данных, представленных на *рис. 2 и 3*, показывает чётко выраженную пространственную асимметрию в расположении траекторий мезомасштабных вихрей различной полярности, сопровождающих струйную зону Восточно-Камчатского течения. Траектории антициклонов преимущественно располагаются ближе к побережью, на западной периферии основной струи, в пределах шельфовой зоны и прилегающего материкового склона. В противоположность этому траектории циклонов, как правило, сосредоточены восточнее — на внешнем крае континентального склона, вблизи бровки Камчатского жёлоба.

Подобное пространственное разделение может отражать различия в механизмах генерации вихрей, обусловленные взаимодействием струйного течения с неоднородным рельефом дна, горизонтальной стратификацией и береговой геометрией. Антициклоны, зарождающиеся в прибрежной зоне или на внутренней стороне струи, вероятно, формируются под влиянием краевых эффектов шельфа и взаимодействия с фронтальными структурами. Циклоны же, образующиеся и перемещающиеся восточнее, могут быть связаны с неустойчивостью основной струи Восточно-Камчатского течения, развивающейся в области резкого изменения глубин и кривизны изобат, характерных для перехода от материкового склона к глубоководной части жёлоба.

Результаты анализа пространственного распределения мезомасштабных вихрей (см. *рис. 2, 3*) свидетельствуют о высокой вихревой активности в северной части исследуемого района, а также в районе Камчатского пролива. Именно здесь, на границе между Беринговым морем и северной частью Тихого океана, формируются устойчивые циклонические и антициклонические вихри, значительная часть которых распространяется далее вдоль восточного побережья Камчатки. Эти вихри, как показано в ряде работ (Prants et al., 2020; Rogachev, Shlyk, 2021, 2025; Solomon, Ahlnäs, 1978), способны на протяжении длительного времени сохранять структурную целостность и переносить водные массы на расстояния в сотни километров.

Таблица 1 представляет усреднённые характеристики долгоживущих (более 90 и более 180 сут) антициклонических и циклонических вихрей, сформировавшихся в районе восточного побережья Камчатки (см. *рис. 1а*). Согласно таблице, антициклоны встречаются реже, чем циклоны: при длительности жизни более 90 сут зарегистрировано 18 антициклонов и 38 циклонов; при продолжительности более 180 сут — 4 и 8 соответственно. Средняя продолжительность жизни антициклонов и циклонов оказывается сопоставимой (157 и 153 сут для >90 сут; 271 и 290 сут для >180 сут), при этом циклонические вихри >180 сут в среднем живут дольше. Антициклоны, особенно с продолжительностью жизни более 90 сут, характеризуются несколько большими размерами (радиусом и площадью) и большей амплитудой, чем циклонические вихри. При этом скорость перемещения обоих типов вихрей варьируется от 11 до 13 см/с, без значимых различий между типами и продолжительностями.

Таблица 1. Средние параметры долгоживущих антициклонических и циклонических вихрей в районе, представленном на *рис. 1а*

Параметры	Антициклоны		Циклоны	
	>90 сут	>180 сут	>90 сут	>180 сут
Количество	18	4	38	8
Продолжительность жизни, сут	157±71	271±47	153±82	290±83
Радиус, км	80,1±29,4	69,4±26,9	69,6±35,1	64,7±28,0
Скорость перемещения, см/с	11,5±4,3	13,2±5,5	12,1±6,6	12,4±7,6
Амплитуда, см	5,2±4,2	4,4±3,1	4,2±5,3	3,7±4,0
Площадь, км ²	18 072±12 786	13 275±11 375	16 630±18 451	13 278±10 934

Отмечается, что у долгоживущих (более 180 сут) циклонов меньше радиус, но больше площадь по сравнению с долгоживущими антициклонами, а также при равенстве средних

радиусов антициклонов более 180 сут и циклонов более 90 сут средняя площадь у циклонических вихрей на 3,3 тыс. км² больше. Нелинейная связь радиуса и площади может возникать вследствие сложной формы циклонических вихрей, влияющей на их суммарную площадь. Вероятно, для антициклонических вихрей такие эффекты наблюдаются реже. Данные табл. 1 показывают, что при сходной продолжительности существования антициклоны обладают более выраженной вертикальной структурой (по амплитуде) и занимают несколько большую площадь, в то время как циклонические структуры формируются чаще и имеют тенденцию к более длительному существованию.

Термохалинный и объёмный перенос через Камчатский пролив

Расчёт потоков через пролив проводился посредством получения компонент скорости течения, нормальных к оси пролива. Для этого была выполнена трансформация исходной системы координат (x, y) , где ось x направлена на восток, а ось y — на север, так что в новой системе координат составляющая скорости U направлена по оси Камчатского пролива, а составляющая скорости V по нормали к ней. Далее проводилась интерполяция этих значений в соответствующие точки. Формулы поворота осей координат имеют вид:

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta, \quad V = u \sin \theta + v \cos \theta,$$

где u, v — зональная и меридиональная компоненты скорости течения, θ — угол между параллелью и осью пролива, $\theta = 33^\circ$.

Расход воды через Камчатский пролив

Для оценки объёма воды, проходящего в северном направлении Q_+ — из океана в Берингово море (вток) и в южном направлении Q_- — из Берингова моря в Тихий океан (выток), используются следующие выражения:

$$Q_+ = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_+(x, z) dz dx, \quad Q_- = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_-(x, z) dz dx,$$

где V_+ — положительные значения нормальной компоненты скорости, V_- — отрицательные значения нормальной компоненты скорости, x_1 и x_2 — горизонтальные границы разреза, а z_0 и z_b — нижний и верхний пределы интегрирования по вертикали, ось z направлена вверх.

Рассчитаем суммарный расход воды Q :

$$Q = Q_+ - |Q_-|.$$

Потоки тепла и соли

Поток тепла из Тихого океана в Берингово море Q_{T+} и в обратном направлении Q_{T-} :

$$Q_{T+} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_+(x, z) H \rho dz dx, \quad Q_{T-} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_-(x, z) H \rho dz dx.$$

Поток соли из Тихого океана в Берингово море Q_{S+} и в обратном направлении Q_{S-} :

$$Q_{S+} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_+(x, z) S \rho dz dx, \quad Q_{S-} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_0}^{z_b} V_-(x, z) S \rho dz dx,$$

где H — теплосодержание (удельная энтальпия) морской воды, Дж/кг, ρ — плотность морской воды, кг/м³, S — солёность морской воды, г/кг, T — температура морской воды, °С.

Суммарные потоки тепла Q_T и соли Q_S :

$$Q_T = Q_{T+} - |Q_{T-}|, \quad Q_S = Q_{S+} - |Q_{S-}|.$$

Для расчётов плотности и теплосодержания (удельной энтальпии) морской воды были использованы термодинамические уравнения морской воды 2010 (TEOS-10). Дополнительно было выполнено преобразование практической солёности (в psu) в абсолютную солёность (в г/кг).

Графики на *рис. 4* отражают межгодовую и сезонную изменчивость трёх ключевых параметров переноса через Камчатский пролив: теплового (в Вт), солевого (в г/с) и объёмного (в Св) потоков. Представлены временные ряды для трёх компонентов: южного (Q_- , красная линия), северного (Q_+ , синяя линия) и суммарного потока (Q , чёрная линия).

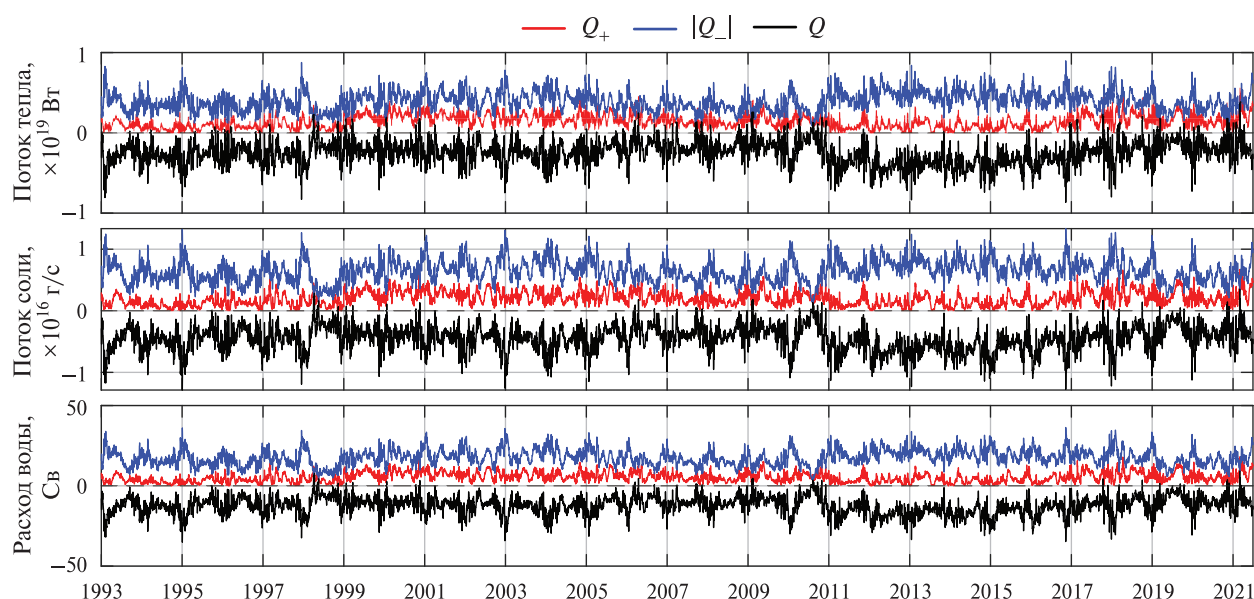


Рис. 4. Поток тепла, соли и расход воды через Камчатский пролив по данным GLORYS12V1 за период 1993–2021 гг. Представлены временные ряды для трёх компонентов: северного (Q_+ , красная линия), южного (Q_- , синяя линия) и суммарного потока (Q , чёрная линия)

Расход воды (*рис. 4*, снизу). Значения расхода воды Q колеблются в пределах ± 10 Св с выраженным преобладанием южного направления переноса (от Берингова моря в Тихий океан), что соответствует характеру Восточно-Камчатского течения. Отдельные экстремумы южного потока Q_- достигают более 40 Св, особенно в зимние месяцы, что может быть связано с усилением градиентов давления и сезонными ветровыми воздействиями (например, действием Алеутской депрессии). Северный поток Q_+ значительно слабее и менее вариативен, что указывает на асимметрию транспортных процессов через пролив.

Поток соли (*рис. 4*, посередине). Перенос соли также демонстрирует преобладание южного направления. Среднее значение потока соли отрицательно и колебания происходят преимущественно за счёт увеличения Q_{S-} . Максимальные значения потока соли, выносимого из Берингова моря, наблюдаются синфазно с экстремумами расхода воды, что указывает на значительное влияние вихрей и струйных переносов на транспорт солёных вод. Интенсивные южные выносы соли могут быть связаны с действием антициклонических вихрей, переносящих трансформированные воды Берингова моря вдоль материкового склона.

Поток тепла (*рис. 4*, сверху). Временной ряд теплового потока через Камчатский пролив демонстрирует выраженную межгодовую и сезонную изменчивость с доминирующим вкладом южного компонента Q_- , так что средние значения суммарного теплового транспорта Q_T остаются отрицательными, что отражает общее преобладание экспорта относительно холод-

ных вод из высоких широт. Интенсивные отрицательные аномалии теплового потока, особенно заметные в зимние периоды, связаны с усилением южного переноса холодных, хорошо перемешанных поверхностных вод. Эти импульсы, как правило, коррелируют с пиками расхода воды, указывая на то, что мезомасштабные вихри и струйные структуры Восточно-Камчатского течения играют важную роль в модуляции теплового баланса на межсезонных временных масштабах. Слабые положительные значения теплового потока, иногда наблюдаемые в летние месяцы, могут быть обусловлены поступлением прогретых поверхностных вод с тихоокеанской стороны через северную часть сечения либо временным ослаблением южного холодного потока, однако они не изменяют общей тенденции выноса холодных вод через пролив.

В табл. 2 представлены средние за период 1993–2021 гг. значения расхода воды, потока тепла и соли. Для всех рассчитанных параметров южный компонент Q_- превалирует над северным Q_+ , как было отмечено выше. Суммарный поток отрицателен и составляет $-12,2$ Св для расхода воды, $-2,5 \cdot 10^{18}$ Вт для потока тепла и $-4,5 \cdot 10^{15}$ г/с для потока соли. Это означает, что через Камчатский пролив в среднем наблюдается выток вод из Берингова моря в северную часть Тихого океана.

Таблица 2. Расход воды, поток тепла и соли через Камчатский пролив, осреднённые за период 1993–2021 гг.

Параметр	Q (суммарный поток)	Q_+ (северный компонент)	Q_- (южный компонент)
Расход воды, Св	$-12,2$	$5,3$	$-17,5$
Поток тепла, Вт	$-2,5 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$-3,9 \cdot 10^{18}$
Поток соли, г/с	$-4,5 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{15}$	$-6,4 \cdot 10^{15}$

Таким образом, южный поток преобладает в течение всего исследуемого периода (1993–2021), что отражает устойчивое направление обмена вод через Камчатский пролив — из Берингова моря в северную часть Тихого океана. Основной вклад в тепловой и солевой перенос осуществляется за счёт южного компонента, ассоциированного с деятельностью Восточно-Камчатского течения и выносом вод субарктического происхождения. Высокая изменчивость всех трёх параметров, особенно на временных масштабах менее одного года, вероятно, обусловлена прохождением мезомасштабных вихрей через сечение пролива. Их способность к длительному существованию и переносу термохалинных аномалий подчёркивает их важную роль в изменчивости расхода через пролив.

Заключение и выводы

Исследование демонстрирует, что мезомасштабные вихри являются неотъемлемым элементом прибрежной динамики, определяющим характер водообмена и циркуляции у восточного побережья Камчатки. Анализ данных META3.2 и GLORYS12V1 подтверждает, что вихревая активность, сосредоточенная в районе Камчатского пролива, обеспечивает эффективный водообмен между Беринговым морем и Тихим океаном. Оценки среднего радиуса долгоживущих вихрей (~ 69 км для антициклонов и ~ 65 км для циклонов по данным META3.2) сопоставимы с результатами натурных измерений и спутниковых наблюдений (Prants et al., 2020; Rogachev, Shlyk, 2019), что подтверждает надёжность оценок, несмотря на сложность точного определения размеров в процессе эволюции вихрей.

На основе представленного материала были получены следующие **выводы**:

1. Траектории антициклонических и циклонических вихрей отчётливо разнесены в пространстве: антициклоны преимущественно развиваются и смещаются в пределах внутренней части Восточно-Камчатского течения, ближе к шельфу и береговой линии, тогда как циклоны формируются на внешней стороне струи, вблизи бровки материкового склона.

2. Временные ряды расхода воды, потока тепла и соли демонстрируют согласованную (синфазную) изменчивость, обусловленную структурой поля скорости, при этом амплитуды отражают реальную изменчивость термохалинных характеристик выносимых вод.
3. Пространственно-временные характеристики мезомасштабных вихрей, включая радиус, скорость дрейфа и продолжительность жизни, сопоставимы с масштабами шельфовых и планетарных волн, таких как волны Кельвина и волны Россби. В частности, размеры долгоживущих вихрей (радиус порядка 70–80 км) и их устойчивое перемещение вдоль береговой границы со скоростью 10–13 см/с указывают на возможность возбуждения прибрежных волн с аналогичными горизонтальными масштабами и характерными временами распространения от десятков суток до нескольких месяцев.

Таким образом, результаты исследования мезомасштабных вихрей у восточного побережья Камчатки демонстрируют, что спутниковые данные, в частности альтиметрия, являются эффективным инструментом для анализа волновых процессов в океане, включая шельфовые волны. Полученные пространственно-временные характеристики вихрей, соизмеримые по масштабам с низкочастотными возмущениями, указывают на их связь с этими волновыми явлениями и позволяют использовать вихри как индикаторы или проявления последних.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования Санкт-Петербургскому государственному университету (грант № 129659573) и Российскому научному фонду (РНФ, грант № 25-17-00021). Расчёты были выполнены на высокопроизводительном вычислительном кластере Тихоокеанского океанологического института (государственное задание № 124022100072-5), программа «Фундаментальные принципы стратегий адаптации для развития Дальнего Востока России в условиях глобального изменения климата» ТОИ ДВО РАН.

Литература

1. Белоненко Т. В., Кубряков А. А. Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 9–18.
2. Белоненко Т. В., Фролова А. В. Антарктическое циркумполярное течение как волновод для волн Россби и мезомасштабных вихрей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 181–190. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-181-190.
3. Белоненко Т. В., Захарчук Е. А., Фукс В. Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб.: Из-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. 215 с.
4. Белоненко Т. В., Кубряков А. А., Станичный С. В. Спектральные характеристики волн Россби северо-западной части Тихого океана // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43–52.
5. Белоненко Т. В., Волков Д. Л., Колдунов А. В. Шельфовые волны в море Бофорта по данным гидродинамической модели MITgcm // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 854–863. DOI: 10.1134/S0030157418060023.
6. Белоненко Т. В., Травкин В. С., Гневышев В. Г., Кочнев А. В. Влияние топографии на перемещение мезомасштабных вихрей на материковом склоне Новозеландского плато // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 253–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-253-266.
7. Власова Г. А., Марченко С. С., Рудых Н. И. Весенний гидродинамический режим в Камчатском проливе за 1950–2017 гг. // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2022. № 4. С. 79–87.
8. Гневышев В. Г., Белоненко Т. В. Доплеровский эффект и волны Россби в океане: краткий экскурс в историю и новые подходы // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 72–92. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(3)-6.
9. Гневышев В. Г., Фролова А. В., Кубряков А. А. и др. Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для Антарктического циркумполярного течения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 39–50. DOI: 10.31857/S0002-351555539-50.

10. Гневнышев В. Г., Фролова А. В., Колдунов А. В., Белоненко Т. В. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // *Фундам. и приклад. гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 1. С. 4–14. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
11. Гневнышев В. Г., Травкин В. С., Белоненко Т. В. (2023a) Групповая скорость и дисперсия шельфовых волн Бухвальда и Адамса. Новый аналитический подход // *Фундам. и приклад. гидрофизика*. 2023. Т. 16. № 2. С. 8–20. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-1.
12. Гневнышев В. Г., Травкин В. С., Белоненко Т. В. (2023b) Топографический фактор и предельные переходы в уравнениях для субинерционных волн // *Фундам. и приклад. гидрофизика*. 2023. Т. 16. № 1. С. 8–23. DOI: 10.48612/fpg/92rg-6t7h-m4a2.
13. Рогачёв К. А., Горин И. И. Перенос массы и долговременная эволюция вихрей Камчатского течения // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 1. С. 19–25.
14. Рогачев К. А., Шлык Н. В. Роль мезомасштабных вихрей в динамике Камчатского и Аляскинского течений // *Изв. ТИНРО*. 2006. Т. 145. С. 228–234.
15. Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В., Колдунов А. В. Шельфовые волны в Большом Австралийском заливе по данным спутниковой альтиметрии // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 6. С. 73–84. DOI: 10.31857/S0205961420050085.
16. Травкин В. С., Белоненко Т. В., Кочнев А. В. Топографические волны в Курильском районе // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 5. С. 222–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234.
17. Andreev A., Pipko I. Water circulation, temperature, salinity, and pCO₂ distribution in the surface layer of the East Kamchatka Current // *J. Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. No. 11. Article 1787. DOI: 10.3390/jmse10111787.
18. Andreev A. G., Shevchenko G. V. Interannual variability of water transport by the East Kamchatka and East Sakhalin Currents and their influence on dissolved oxygen concentration in the Sea of Okhotsk and subarctic Pacific // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2008. V. 33. No. 10. P. 657–664. DOI: 10.3103/S1068373908100075.
19. Belonenko T. V., Bashmachnikov I. L., Kubryakov A. A. Horizontal advection of temperature and salinity by Rossby waves in the North Pacific // *Intern. J. Remote Sensing*. 2018. V. 39. No. 8. P. 2177–2188. DOI: 10.1080/01431161.2017.1420932.
20. Fedorov A. M., Belonenko T. V. Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database // *Russian J. Earth Sciences*. 2020. V. 20. No. 2. Article ES2002. DOI: 10.2205/2020ES000694.
21. Gill A. E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 1982. 680 p.
22. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Kubryakov A. A. et al. Interaction between Rossby waves and a jet flow: Basic equations and verification for the Antarctic Circumpolar Current // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. No. 5. P. 412–422. DOI: 10.1134/S0001433819050074.
23. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // *Russian J. Earth Sciences*. 2021. V. 21. No. 5. Article ES5003. DOI: 10.2205/2021ES000773.
24. Hasselmann K. An ocean model for climate variability studies // *Progress in Oceanography*. 1982. V. 11. No. 2. P. 69–92. DOI: 10.1016/0079-6611(82)90004-0.
25. Kinney J. C., Maslowski W. On the oceanic communication between the Western Subarctic Gyre and the deep Bering Sea // *Deep Sea Research Pt. I: Oceanographic Research Papers*. 2012. V. 66. P. 11–25. DOI: 10.1016/j.dsr.2012.04.001.
26. LeBlond P. H., Mysak L. A. *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series. V. 20. Elsevier, 1981. 602 p.
27. Nishioka J., Hirawake T., Nomura D. et al. Iron and nutrient dynamics along the East Kamchatka Current, western Bering Sea Basin and Gulf of Anadyr // *Progress in Oceanography*. 2021. V. 198. Article 102662. DOI: 10.1016/j.pocean.2021.102662.
28. Pegliasco C., Busché C., Faugère Y. Mesoscale Eddy Trajectory Atlas META3.2 Delayed-Time all satellites: version META3.2 DT allsat. 2022. DOI: 10.24400/527896/A01-2022.005.210802.
29. Prantis S. V., Budyansky M. V., Lobanov V. B. et al. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trench eddies // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2020. V. 125. No. 6. Article e2020JC016187. DOI: 10.1029/2020JC016187.
30. Rogachev K. A., Shlyk N. V. The role of the Aleutian eddies in the Kamchatka Current warming // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018. V. 43. P. 43–48. DOI: 10.3103/S1068373918010065.
31. Rogachev K. A., Shlyk N. V. Characteristics of the Kamchatka Current eddies // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. V. 44. P. 416–423. DOI: 10.3103/S1068373919060062.
32. Rogachev K., Shlyk N. Record-breaking warming in the Kamchatka Current halocline // *Ocean Dynamics*. 2021. V. 71. No. 5. P. 545–557. DOI: 10.1007/s10236-021-01445-0.

33. Rogachev K. A., Shlyk N. V. Cooling of the Oyashio and Kamchatka Current halocline in extreme years // Russian Meteorology and Hydrology. 2025. V. 50. No. 2. P. 139–145. DOI: 10.3103/S1068373925020062.
34. Solomon H., Ahlnäs K. Eddies in the Kamchatka Current // Deep Sea Research. 1978. V. 25. No. 4. P. 403–410.

Using satellite altimetry to study mesoscale eddies and coastal wave processes near the Kamchatka coast

S. P. Khudyakova^{1,3}, T. V. Belonenko¹, A. V. Kochnev²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: khydyakova.s@gmail.com

² Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk 163002, Russia

³ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

The study examines the role of mesoscale eddies in shaping the coastal dynamics off the eastern coast of Kamchatka, with particular focus on the Kamchatka Strait region where eddy activity is most intense. It is shown that anticyclonic and cyclonic structures form in different zones of the East Kamchatka Current, exhibiting spatial asymmetry: anticyclones are located closer to the coast, while cyclones form near the continental slope edge. Analysis of satellite and model data (META3.2 and GLORYS12V1) reveals that mesoscale eddies play a key role in the seasonal and interannual modulation of volume, heat, and salt transport, primarily supporting the southward export of water from the Bering Sea to the northwestern Pacific. Considering that theoretical studies indicate the ability of mesoscale eddies to initiate low-frequency disturbances, including shelf and internal Kelvin waves, the obtained estimates of their spatial and temporal characteristics in the Kamchatka Strait region — radii of about 70–80 km and drift speeds of 10–13 cm/s — suggest that these structures may act as potential generators of coastal and planetary waves with comparable scales. Thus, the results highlight the significance of mesoscale eddies not only as active participants in water exchange but also as sensitive indicators of large-scale oceanic dynamics, offering a valuable tool for diagnosing low-frequency variability in physically complex and poorly studied coastal regions.

Keywords: satellite data, altimetry, mesoscale eddies, Kamchatka Strait, planetary waves, Kelvin waves, shelf waves, vortex dynamics, META3.2, GLORYS12V1

Accepted: 09.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-298-311

References

1. Belonenko T. V., Kubryakov A. A., Temporal variability of the phase velocity of Rossby waves in the North Pacific, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 3, pp. 9–18 (in Russian).
2. Belonenko T. V., Frolova A. V., Antarctic Circumpolar Current as a waveguide for Rossby waves and mesoscale eddies, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 1, pp. 181–190 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-181-190.
3. Belonenko T. V., Zakharchuk E. A., Fuks V. R., *Gradientno-vikhrevyye volny v okeane* (Gradient-vortical waves in the ocean), Saint Petersburg: Izd. Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2004, 215 p. (in Russian).
4. Belonenko T. V., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Spectral characteristics of Rossby waves in the Northwestern Pacific based on satellite altimetry, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, V. 52, No. 9, pp. 920–928, DOI: 10.1134/S0001433816090073.
5. Belonenko T. V., Volkov D. L., Koldunov A. V., Shelf waves in the Beaufort Sea in a high-resolution ocean model, *Oceanology*, 2018, V. 58, Iss. 6, pp. 778–785, DOI: 10.1134/S0001437018060024.

6. Belonenko T. V., Travkin V. S., Gnevyshev V. G., Kochnev A. V., Influence of topography on the movement of mesoscale eddies along the continental slope of the New Zealand Plateau, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 253–266 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-253-266.
7. Vlasova G. A., Marchenko S. S., Rudykh N. I., Spring hydrodynamic regime in the Kamchatka Strait in 1950–2017, *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2022, No. 4, pp. 79–87 (in Russian).
8. Gnevyshev V. G., Belonenko T. V., Doppler effect and Rossby waves in the ocean: A brief history and new approaches, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2023, V. 16, No. 3, pp. 72–92 (in Russian), DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(3)-6.
9. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Kubryakov A. A. et al., Interaction between Rossby waves and a jet flow: basic equations and verification for the antarctic circumpolar current, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, V. 55, No. 5, pp. 412–422, DOI: 10.1134/S0001433819050074.
10. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Koldunov A. V., Belonenko T. V., Topographic effect for Rossby waves on a zonal shear flow, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2021, V. 14, No. 1, pp. 4–14 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667321010019.
11. Gnevyshev V. G., Travkin V. S., Belonenko T. V. (2023a), Group velocity and dispersion of Buchwald and Adams shelf waves. A new analytical approach, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2023, V. 16, No. 2, pp. 8–20 (in Russian), DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-1.
12. Gnevyshev V. G., Travkin V. S., Belonenko T. V. (2023b), Topographic factor and limit transitions in the equations for subinertial waves, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2023, V. 16, No. 1, pp. 8–23 (in Russian), DOI: 10.48612/fpg/92rg-6t7h-m4a2.
13. Rogachev K. A., Gorin I. I., Mass transport and long-term evolution of the Kamchatka Current eddies, *Oceanologiya*, 2004, V. 44, No. 1, pp. 19–25 (in Russian).
14. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Role of mesoscale eddies in the dynamics of the Kamchatka and Alaskan currents, *Izvestiya TINRO*, 2006, V. 145, pp. 228–234 (in Russian).
15. Sandalyuk N. V., Belonenko T. V., Koldunov A. V., Shelf waves in the Great Australian Bight based on satellite altimetry data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, V. 57, pp. 1117–1126, DOI: 10.1134/S0001433821090619.
16. Travkin V. S., Belonenko T. V., Kochnev A. V., Topographic waves in the Kuril region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 222–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234.
17. Andreev A., Pipko I., Water circulation, temperature, salinity, and pCO₂ distribution in the surface layer of the East Kamchatka Current, *J. Marine Science and Engineering*, 2022, V. 10, No. 11, Article 1787, DOI: 10.3390/jmse10111787.
18. Andreev A. G., Shevchenko G. V., Interannual variability of water transport by the East Kamchatka and East Sakhalin Currents and their influence on dissolved oxygen concentration in the Sea of Okhotsk and subarctic Pacific, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, V. 33, No. 10, pp. 657–664, DOI: 10.3103/S1068373908100075.
19. Belonenko T. V., Bashmachnikov I. L., Kubryakov A. A., Horizontal advection of temperature and salinity by Rossby waves in the North Pacific, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, V. 39, Iss. 8, pp. 2177–2188, DOI: 10.1080/01431161.2017.1420932.
20. Fedorov A. M., Belonenko T. V., Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database, *Russian J. Earth Sciences*, 2020, V. 20, No. 2, Article ES2002, DOI: 10.2205/2020ES000694.
21. Gill A. E., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, 1982, 680 p.
22. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Kubryakov A. A. et al., Interaction between Rossby Waves and a jet flow: Basic equations and verification for the Antarctic Circumpolar Current, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, V. 55, No. 5, pp. 412–422, DOI: 10.1134/S0001433819050074.
23. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V., On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, V. 21, No. 5, Article ES5003, DOI: 10.2205/2021ES000773.
24. Hasselmann K., An ocean model for climate variability studies, *Progress in Oceanography*, 1982, V. 11, No. 2, pp. 69–92, DOI: 10.1016/0079-6611(82)90004-0.
25. Kinney J. C., Maslowski W., On the oceanic communication between the Western Subarctic Gyre and the deep Bering Sea, *Deep Sea Research Pt. I: Oceanographic Research Papers*, 2012, V. 66, pp. 11–25, DOI: 10.1016/j.dsr.2012.04.001.
26. LeBlond P. H., Mysak L. A., *Waves in the Ocean*, Elsevier Oceanography Series, V. 20, Elsevier, 1981, 602 p.
27. Nishioka J., Hirawake T., Nomura D. et al., Iron and nutrient dynamics along the East Kamchatka Current, western Bering Sea Basin and Gulf of Anadyr, *Progress in Oceanography*, 2021, V. 198, Article 102662, DOI: 10.1016/j.pocean.2021.102662.

28. Pegliasco C., Busché C., Faugère Y., *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas META3.2 Delayed-Time all satellites: version META3.2 DT allsat*, 2022, DOI: 10.24400/527896/A01-2022.005.210802.
29. Prants S. V., Budyansky M. V., Lobanov V. B. et al., Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trench eddies, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, V. 125, No. 6, Article e2020JC016187, DOI: 10.1029/2020JC016187.
30. Rogachev K. A., Shlyk N. V., The role of the Aleutian eddies in the Kamchatka current warming, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, V. 43, pp. 43–48, DOI: 10.3103/S1068373918010065.
31. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Characteristics of the Kamchatka Current eddies, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, V. 44, pp. 416–423, DOI: 10.3103/S1068373919060062.
32. Rogachev K., Shlyk N., Record-breaking warming in the Kamchatka Current halocline, *Ocean Dynamics*, 2021, V. 71, No. 5, pp. 545–557, DOI: 10.1007/s10236-021-01445-0.
33. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Cooling of the Oyashio and Kamchatka Current halocline in extreme years, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2025, V. 50, No. 2, pp. 139–145, DOI: 10.3103/S1068373925020062.
34. Solomon H., Ahlnäs K., Eddies in the Kamchatka Current, *Deep Sea Research*, 1978, V. 25, No. 4, pp. 403–410.