

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 455—472.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):455—472.

Научная статья

УДК [551.465.5:528.8:004.94](265.54)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472

Совместный анализ данных SWOT и модели ROMS для изучения субмезомасштабных процессов на примере залива Посьета в Японском море

Александр Алексеевич Дидов^{1,2},

Павел Аркадьевич Файман^{1,2}, Максим Васильевич Будянский^{1,2},

Татьяна Васильевна Белоненко²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
btvlisab@yandex.ru

Аннотация. Недостаток разрешения спутниковой альтиметрии и верификации моделей ограничивает изучение прибрежных вихрей. Данные SWOT (километровое разрешение) фиксируют только геострофическую скорость, игнорируя ветровой дрейф на мелководье. Предложен комплексный подход с использованием SWOT и модели ROMS (пространственное разрешение — 500 метров), воспроизводящей полное поле скорости. На примере залива Посьета (Японское море) в 2024 г. показано соответствие структур вихрей в SWOT и ROMS. Сравнение позволило разделить барический и дрейфовый вклады в течения. Различия скоростей связаны с ветровой составляющей, затухающей с глубиной. Генерация вихрей обусловлена инерционной неустойчивостью при восточных ветрах. Совместное применение SWOT и ROMS эффективно для верификации моделей и изучения субмезомасштабной динамики, особенно для экологического мониторинга прибрежных акваторий.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, SWOT, ROMS, залив Посьета, геострофическое приближение, дрейфовая компонента, верификация модели, прибрежная циркуляция.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке грантов РНФ № 25-77-00044 (моделирование в ROMS) и № 25-17-00021 (сбор и анализ спутниковых данных).

Для цитирования: Дидов А. А., Файман П. А., Будянский М. В., Белоненко Т. В. Совместный анализ данных SWOT и модели ROMS для изучения субмезомасштабных процессов на примере залива Посьета в Японском море // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 455—472. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472.

Joint analysis of SWOT data and ROMS model for studying submesoscale processes using the example of Posyet Bay in the Sea of Japan

*Alexander A. Didov^{1,2}, Pavel A. Fayman^{1,2}, Maxim V. Budyansky^{1,2},
Tatyana V. Belonenko²*

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, btvlisab@yandex.ru

Summary. The study of submesoscale eddies in coastal oceanographic systems is challenged by fundamental methodological limitations due to their small spatial (units to tens of kilometers) and temporal (hours to days) scales. Traditional satellite altimetry data, such as AVISO, have insufficient resolution for reliable identification of such structures in shelf zones, and numerical models, even at high resolution, require independent verification. The new SWOT (Surface Water and Ocean Topography) mission, providing two-dimensional sea surface height measurements with kilometer-scale resolution, offers unique opportunities for observing submesoscale eddies. However, geostrophic velocities derived from SWOT data reflect only the baric component of currents and do not satisfy the full momentum equation in shallow coastal areas where the wind-induced drift (Ekman) component is significant. This fundamental limitation prevents SWOT from being used as a standalone tool for three-dimensional dynamic analysis.

To overcome these limitations, we propose a combined approach that integrates SWOT altimetry with regional modeling using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). The model, configured with 500 m horizontal resolution and 48 vertical layers, reproduces the full velocity field, including baric, drift, and turbulent components, while SWOT data serve as an independent reference for verifying the baric part. Using Posyet Bay (Sea of Japan) as a test site, we demonstrate for the episodes of May and August 2024 that visual comparison of absolute dynamic topography and geostrophic velocity fields from SWOT with model outputs allows (1) confirming the adequacy of ROMS in reproducing the spatial structure and position of anticyclonic eddies, and (2) quantitatively separating the baric and drift contributions to surface currents, showing that differences in velocity amplitudes at the 5 m depth horizon are indeed due to the wind-driven component, which decays with depth. The eddies were detected using the HEPTA algorithm, which reliably identifies elliptic and hyperbolic points in the velocity field. The comparison was performed for two distinct periods (30–31 May and 21–23 August 2024) and consistently showed that the model captures the eddy positions, while velocity magnitudes differ at the surface but converge at 10 m depth, confirming the Ekman nature of the difference. The identified anticyclonic eddies have horizontal scales of about 20 km and lifetimes of several days, consistent with submesoscale features. The mechanism of their formation is attributed to inertial instability arising from enhanced horizontal velocity shear during easterly wind events. The combined use of SWOT and ROMS thus provides an effective methodology for studying submesoscale dynamics in coastal areas, where each method individually has inherent limitations. This approach opens prospects for validating regional circulation models and assessing the role of eddy transport in the spread of polluted river waters, which is critically important for the ecological monitoring of the Far Eastern Marine Reserve.

Keywords: submesoscale eddies, SWOT, ROMS, Posyet Bay, geostrophic approximation, drift component, model verification, coastal circulation.

Acknowledgments: The study was supported by Russian Science Foundation grants No. 25-77-00044 (ROMS modeling) and No. 25-17-00021 (collection and analysis of satellite data).

For citation: Didov A. A., Fayman P. A., Budyansky M. V., Belonenko T. V. Joint analysis of SWOT data and ROMS model for studying submesoscale processes using the example of Posyet Bay in the Sea of Japan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(455—472). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472. (In Russ.).

Введение

Изучение субмезомасштабных динамических процессов в океане, в частности вихрей с горизонтальными масштабами от единиц до десятков километров и временем жизни от нескольких часов до нескольких суток, представляет собой сложную методологическую задачу. Их идентификация и анализ в прибрежных зонах особенно затруднены из-за мелководности, влияния суши, переменчивости ветра и быстрой эволюции структур. Традиционные спутниковые альтиметрические данные (например, AVISO) имеют пространственное разрешение порядка 25—50 км, что недостаточно для надёжного выделения субмезомасштабных вихрей, а численные модели даже при высоком разрешении требуют независимой верификации наблюдениями. Новые данные миссии SWOT (Surface Water and Ocean Topography) с километровым разрешением открывают беспрецедентные возможности для визуализации таких структур, однако они имеют собственное ограничение: геострофические скорости, рассчитанные по измерениям уровня моря, отражают только барическую составляющую течений и не учитывают дрейфовую компоненту, связанную с ветром, которая в мелководных районах может быть сопоставима по величине. Для полноценного анализа динамики необходим комплексный подход, сочетающий спутниковую альтиметрию и региональное гидродинамическое моделирование, способное воспроизводить полное поле скорости.

Объектом исследования является западная часть залива Петра Великого (Японское море), включающая акваторию залива Посыета, мелководные бухты, устье реки Туманной и прилегающую область, а также часть акватории Дальневосточного морского заповедника (рис. 1). Река Туманная — пограничная между Китаем и КНДР, а в нижнем течении — между КНДР и Россией. Около 70 % стока формируется на территории Китая, почти 30 % — в Северной Корее, доля России составляет менее 1 %. Длина реки 549 км (из них 17,3 км по границе России), площадь бассейна 41 200 км².

При впадении в море река образует обширную заболоченную дельту с разветвлёнными рукавами, островами, озёрами и болотами. Среднегодовой расход воды 215 м³/с с ярко выраженной сезонной изменчивостью [1]. В бассейне существуют экологические проблемы из-за роста концентрации загрязняющих веществ, связанного с индустриализацией и урбанизацией на территории Китая [1—4]. Транспорт речного плюма реки Туманной в северо-восточном направлении может негативно влиять на экосистемы Дальневосточного морского заповедника [5], а также создавать экономический ущерб для туристического и рыбопромышленного бизнеса на побережье. Однако в данной работе экологический аспект служит лишь иллюстративным примером, а главная задача состоит в отработке методологии совместного анализа спутниковых и модельных данных для преодоления ограничений каждого из методов в отдельности.

В западной части залива Петра Великого регулярно наблюдаются субмезомасштабные вихри различной полярности. В летне-осенний период их формирование связывают с симметричной и центробежной неустойчивостью после апвеллинга [6, 7]. Эти вихри играют важную роль в переносе речных вод, однако их исследование традиционно опиралось на судовые съёмки и спутниковые данные

по температуре и цвету воды, которые сильно зависят от облачности и не дают прямых оценок циркуляции [8—10]. Применение альтиметрии нового поколения SWOT и её совместный анализ с высокоразрешающей моделью ROMS позволяют не только верифицировать модель, но и разделить вклад барической и дрейфовой

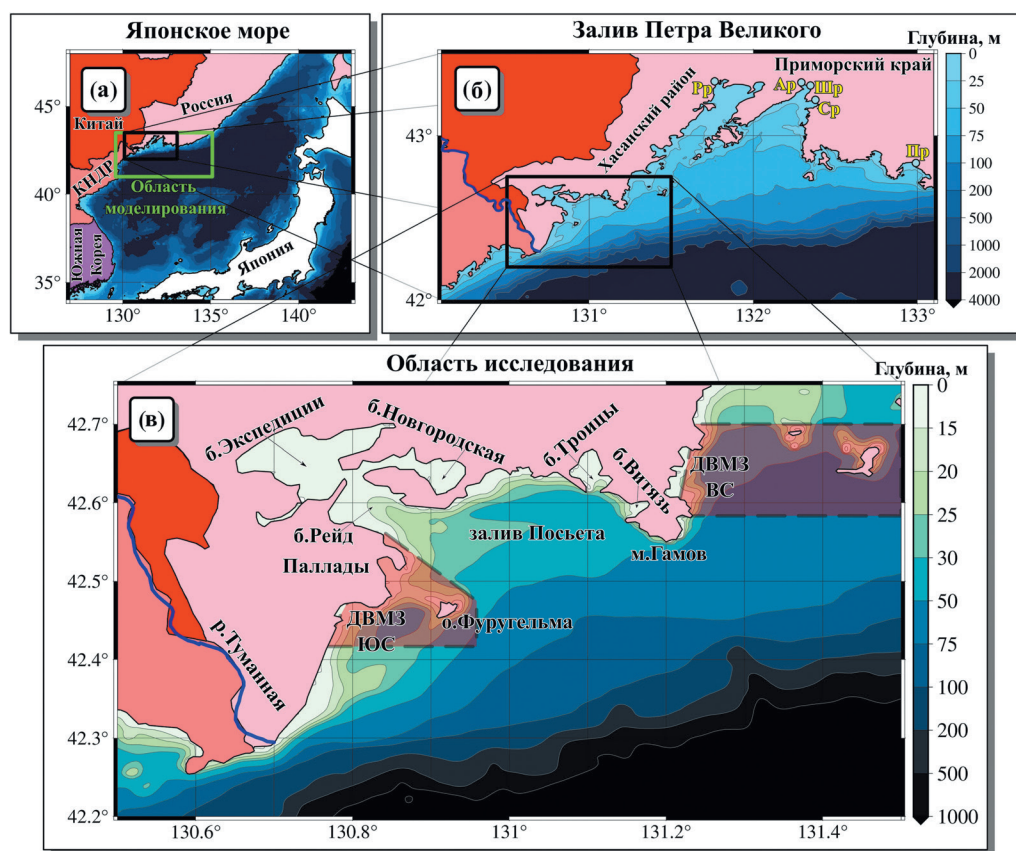


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследования: а) Японское море; б) прибрежная часть Японского моря с прилегающей территорией; в) область моделирования ROMS (показана прямоугольником).

Используемые обозначения: Рр — устье р. Раздольной; Шр — устье р. Шкотовки; Ар — устье р. Артёмовки; Ср — устье р. Суходола; Пр — устье р. Партизанской; ДВМЗ ВС — восточный сектор Дальневосточного морского заповедника; ДВМЗ ЮС — южный сектор Дальневосточного морского заповедника.

Fig. 1. Bathymetric map of the study area: a) Sea of Japan; b) coastal part of the Sea of Japan with adjacent territory; c) ROMS model domain (shown by rectangle).

Designations: Рр — mouth of the river Razdolnaya; Шр — mouth of the river Shkotovka; Ар — mouth of the river Artemovka; Ср — mouth of the river Sukhodol; Пр — mouth of the river Partizanskaya; ДВМЗ ВС — eastern sector of the Far Eastern Marine Reserve; ДВМЗ ЮС — southern sector of the Far Eastern Marine Reserve.

компонент в поверхностные течения, что принципиально важно для понимания физических механизмов вихреобразования в условиях мелководья.

Изучение субмезомасштабных вихрей затруднено из-за их малых пространственных (единицы—десятки км) и временных (часы—несколько суток) масштабов. Спутниковые данные (CHL, SST) позволяют идентифицировать вихри, однако высокая облачность и ограниченное разрешение стандартных альтиметрических данных (например, AVISO) не всегда дают возможность надёжно фиксировать такие структуры в прибрежных зонах. Новые данные спутниковой альтиметрии SWOT (Surface Water and Ocean Topography) с 16 декабря 2022 г. предоставляют беспрецедентные возможности. Это открывает возможность исследования субмезомасштабных вихрей в прибрежных акваториях с высокой точностью. Однако необходимо подчеркнуть, что геострофическое приближение, лежащее в основе расчёта скоростей по данным альтиметрии, строго справедливо лишь для глубоководных районов при малых числах Россби. В прибрежных мелководных акваториях ветер создаёт значительный экмановский перенос, не связанный с градиентом давления, и потому геострофические скорости из SWOT не отражают полное поле течений, особенно в верхнем 5—10-метровом слое. Это ограничение требует привлечения численных моделей, которые учитывают все действующие силы.

Наряду с дистанционными данными для изучения вихревой динамики активно применяются численные модели. Региональная модель на основе ROMS (Regional Ocean Modeling System) хорошо зарекомендовала себя для воспроизведения циркуляции в северо-западной части Японского моря и заливе Петра Великого [11, 12]. Предыдущие работы показали, что ROMS с высоким разрешением (около 600 м) адекватно воспроизводит субмезомасштабные вихри, наблюдаемые в спутниковых и судовых данных [6]. Показано, что циклонические вихри в прибрежной зоне возникают вследствие симметричной и центробежной неустойчивости и отвечают за перенос холодных солёных вод из мелководных бухт в открытую часть залива [7]. Тем не менее, ни модель, ни спутниковые данные по отдельности не дают полной картины: модель нуждается в верификации, а SWOT даёт только барическую компоненту. Только их совместное использование позволяет преодолеть эти ограничения.

Однако ключевой нерешённой проблемой остаётся отсутствие надёжного метода верификации модельных субмезомасштабных вихрей в прибрежных зонах. Стандартная альтиметрия не имеет достаточного разрешения, а судовые данные эпизодичны. SWOT предоставляет высокое разрешение, но его геострофические скорости не учитывают дрейфовую компоненту, поэтому необходим комплексный подход, позволяющий разделить барическую и небарическую части течений и на этой основе валидировать модель. Предыдущие работы [6, 7] использовали моделирование и спутниковые данные низкого разрешения, но без привлечения SWOT, что не давало возможности отделить барический сигнал от ветрового.

Цель данной работы — разработать и апробировать методологию комплексного анализа субмезомасштабных вихрей в прибрежной зоне, основанную на совместном использовании данных спутниковой альтиметрии SWOT (дающих барическую компоненту) и региональной модели ROMS (дающей полное поле

скорости). На примере залива Посьета в Японском море показано, как такое сочетание позволяет верифицировать модель, разделить барический и дрейфовый вклады в поверхностные течения и на этой основе идентифицировать механизмы вихреобразования. Для достижения цели решаются следующие задачи:

— воспроизведение циркуляции вод в западной части залива Петра Великого за период март—ноябрь 2024 г. с помощью ROMS с разрешением 500 м и 48 вертикальными слоями;

— проведение визуального сопоставления полей абсолютной динамической топографии и геострофических скоростей по данным SWOT с модельными полями для эпизодов наличия вихрей (30—31 мая и 21—23 августа 2024 г.) с целью верификации барической составляющей модели.

Данные и методы

Данные спутниковой альтиметрии SWOT

Для валидации результатов моделирования и идентификации вихревых структур использовались данные миссии SWOT, разработанной NASA и CNES при участии CSA и UK Space Agency; запуск состоялся 16 декабря 2022 г. [13, 14]. Главная цель миссии — измерение уровня поверхностных вод как в океане, так и на континенте, что делает её первой космической миссией по комплексному мониторингу поверхностных вод Земли [13]. Ключевой инструмент — Ка-диапазонный радарный интерферометр KaRIn (центральная частота 35,75 ГГц) с двумя антеннами на десятиметровой штанге, обеспечивающий интерферометрическую базу [14]. KaRIn впервые обеспечивает двумерные измерения высоты водной поверхности с километровым разрешением по полосе захвата 120 км [15], в то время как все предыдущие миссии давали только надирные измерения вдоль трека [16]. Инструмент даёт данные по двум субполосам по 50 км с каждой стороны от надирного трека; двадцатикилометровый промежуток вдоль надира перекрывается классическим надирным альтиметром. Общая ширина полосы — 120 км. Высота орбиты 970 км, глобальное покрытие до широты $\sim 78^\circ$ с.ш. и ю.ш., период повторения — 21 день [13].

Пространственное разрешение SWOT значительно превосходит традиционные надирные альтиметры. Стандартные продукты уровня 2 (L2) дают разрешение около 1—2 км вдоль трека, в некоторых режимах — до 250 м (AVISO, 2024). Для сравнения, разрешение Jason-3 составляет 25—50 км. SWOT позволяет наблюдать процессы в масштабах 15—30 км в зависимости от состояния моря [13], а в отдельных случаях волны длиной до 5 км [16]. Это особенно важно для субмезомасштабных процессов (10—50 км), ранее недоступных для спутникового мониторинга.

В работе использовались данные уровня 2 (L2), содержащие поля абсолютной динамической топографии (ADT) и геострофические скорости для 30—31 мая и 21—23 августа 2024 г., когда по данным SWOT прослеживались ярко выраженные антициклонические вихри. Выбор периодов обусловлен наличием качественных измерений и возможностью сопоставления с моделью ROMS.

Данные SWOT позволяют идентифицировать вихревые структуры и оценивать их пространственные характеристики (размеры, форму), а также интенсивность, что особенно важно для прибрежных акваторий, где традиционная альтиметрия теряет точность из-за влияния суши. Важно подчеркнуть, что геострофические скорости, рассчитываемые по ADT, предполагают баланс между градиентом давления и силой Кориолиса. Этот баланс нарушается в прибрежных мелководных районах, где существенную роль играет ветровое трение, создающее экмановский дрейф, поэтому поля скоростей из SWOT отражают лишь барическую компоненту и не могут использоваться как прямое измерение полного течения. Это фундаментальное ограничение учитывается в настоящей работе при интерпретации результатов сравнения с моделью ROMS. Отметим, что данные SWOT использовались для качественной верификации ROMS. Строгий количественный анализ потребует большего объёма спутниковых данных и более широкой выборки событий, охватывающих разные сезоны и гидрологические условия. Данная работа является первым шагом в этом направлении.

Модель океана ROMS

Для расчёта циркуляции использовалась региональная модель ROMS — трёхмерная нелинейная модель на примитивных уравнениях со свободной поверхностью и s -координатами по вертикали [17]. Модель широко применяется для прибрежных и шельфовых задач [18—25] и доступна через официальный сайт (www.myroms.org). В основе модели примитивные уравнения гидростатики в приближении Буссинеска [17]. Вертикальная s -координата адаптируется к рельефу дна [26]. Используется структурированная горизонтальная сетка, вертикальное разрешение может варьироваться за счёт растяжения слоёв. Численный алгоритм основан на разделении баротропной и бароклинной мод (split-explicit) [17], что повышает вычислительную эффективность. Для согласования мод применяется специальная схема фильтрации, обеспечивающая консервацию трассеров.

В ROMS реализованы параметризации вертикального турбулентного перемешивания [23], а также опции для биогеохимии, био-оптики, переноса осадков и морского льда [22]. Поддерживаются вложенные и композитные сетки. Доступны также линейная и сопряжённая модели для анализа чувствительности и вариационного усвоения данных [27, 28]. Конфигурация модели основана на предыдущих работах [6, 7, 11, 12]. Сеточная область: 41—43,5° с.ш. и 129,6—135,1° в.д. Горизонтальный шаг равен 500 м, по вертикали 48 s -слоёв с улучшенным разрешением у поверхности и дна. Период моделирования взят за 1993—2024 гг., для анализа выбраны результаты с марта по ноябрь 2024 г. с часовой дискретностью.

Потоки тепла и соли на поверхности рассчитаны по bulk-формулам [29] с использованием среднесуточных данных реанализа NCEP-DOE AMIP-II [30]. Скорость ветра заимствована из скаттерометра Advanced SCATterometer [31]. Граничные условия на открытых границах — на основе реанализа JCOPE2 [32] с комбинацией отражения и релаксации; для нормальной баротропной скорости использовалось условие Флэттера [33], для высоты поверхности — условие

Чепмена [34]. Среднесуточные климатические расходы рек (Партизанская, Суходол, Шкотовка, Артёмовка, Раздольная) осреднены за период с 2013 г. По 2022 г. по данным Федерального агентства водных ресурсов (gmvo.skniivh.ru).

Все расчёты верификации барической части, которую и обеспечивает SWOT, выполнялись на оборудовании Центра коллективного пользования Дальневосточного вычислительного ресурса Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (<https://www.cc.dvo.ru>).

Определение центров вихревых образований

Для точной локализации центров вихревых образований в каждый момент времени используется алгоритм НЕРТА (Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm) [35, 36]. Этот алгоритм позволяет надёжно выделять особые точки поля скорости:

- эллиптические точки — центры циклонов и антициклонов;
- гиперболические точки — седла, разделяющие потоки.

Применение НЕРТА обеспечивает высокую точность и воспроизводимость определения центра вихрей, что критически важно для корректного анализа структуры водных масс внутри анализируемого вихревого образования. На картах эллиптические точки показаны треугольниками, а гиперболические — крестиками.

Комплексный анализ спутниковых (SWOT) и модельных (ROMS) данных

Изучение субмезомасштабных вихрей в прибрежных акваториях сопряжено с методологическими трудностями, обусловленными малыми масштабами и коротким временем жизни (обычно 3—5 суток) [37]. В мелководных районах (средняя глубина залива Посыета ~20 м) поверхностная циркуляция сильно зависит от ветра, и поэтому данные альтиметрии в геострофическом приближении заведомо неполны [38, 39]. Только сочетание данных SWOT и высокоразрешающего моделирования ROMS позволяет разделить барическую и дрейфовую компоненты и верифицировать модель. Однако совместный анализ требует учёта физических различий методов, что даёт уникальную возможность для оценки вклада различных механизмов.

Основное ограничение SWOT в исследуемом районе — мелководность. Альтиметрия измеряет аномалии уровня моря (SSH), по которым рассчитываются геострофические скорости. Геострофический баланс справедлив для глубокого моря, в то время как в прибрежных мелководных зонах ветер создаёт дрейфовую составляющую (экмановский перенос), не связанную с градиентом давления и не учитываемую в геострофике, поэтому геострофические скорости из SWOT отражают только барическую компоненту и не дают полной картины реальных течений, особенно в ветроактивные периоды. ROMS, напротив, учитывает полный комплекс факторов: ветровое напряжение, потоки тепла и пресной воды, батиметрию, вертикальное перемешивание. Если SWOT даёт только геострофическую часть скорости, то ROMS — полное поле скорости, поэтому поля скоростей могут различаться, особенно в верхнем слое 5—10 м, где дрейфовая компонента максимальна.

На рис. 2 представлено сопоставление полей скоростей для 30 и 31 мая 2024 г. Из их анализа следует:

— В обоих наборах данных чётко идентифицируется один и тот же антициклонический вихрь в центральной части залива Посьета (между о. Фуругельм и материком). Положение центра по алгоритму НЕРТА практически совпадает. Это свидетельствует о преимущественно барической природе вихря.

— Направления скоростей в вихре совпадают, но величины различаются. На горизонте 5 м скорости в ROMS заметно выше, чем геострофические из SWOT, что обусловлено дрейфовой компонентой. На 10 м различие уменьшается, так как влияние ветра затухает. Это прямое доказательство того, что ROMS корректно воспроизводит ветровую составляющую, ослабевающую с глубиной, тогда как SWOT показывает только ее барическую часть.

— Гиперболические точки (области деформации и обмена вод) также совпадают, что подтверждает гидродинамическую согласованность полей.

Таким образом, комплексный анализ позволяет преодолеть ограничения каждого метода: SWOT даёт независимую картину барической составляющей и служит реперной точкой для верификации, а ROMS предоставляет полное поле скорости и трёхмерную структуру, что помогает отслеживать эволюцию вихрей с часовой дискретностью. Это позволяет оценить вклад барической и дрейфовой компонент, а значит, понять физические механизмы формирования вихрей. Сложность оконтуривания субмезомасштабных вихрей обусловлена их малым временем жизни и изменчивостью формы в прибрежной зоне. SWOT с 21-дневным периодом не отслеживает быструю эволюцию, но даёт мгновенный снимок. ROMS с часовой дискретностью дает возможность детально проследить рождение, эволюцию и распад вихрей.

В работе для двух дней (30 и 31 мая 2024 г.) проведено визуальное сопоставление полей ADT и геострофических скоростей из SWOT с полями уровня и полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 и 10 м. Идентифицированы вихревые структуры, прослеживаемые в обоих наборах. Результаты подтверждают, что ROMS адекватно воспроизводит пространственное положение и размеры крупных вихревых образований, наблюдаемых по SWOT. Совпадение положения вихрей, несмотря на различия в амплитудах скоростей, свидетельствует о высокой точности воспроизведения барической составляющей, а различия обусловлены дрейфовой компонентой, которую модель учитывает, а SWOT — нет. Таким образом, верификация подтверждает, что ROMS корректно описывает обе составляющие циркуляции, что делает её надёжным инструментом для анализа завихренности, выделения зон неустойчивости и изучения механизмов вихреобразования.

Аналогичное сопоставление было выполнено для эпизода 21—23 августа 2024 г. (рис. 3). Как и в майском случае, в полях геострофических скоростей из SWOT и полных скоростей ROMS на горизонтах 5 и 10 м уверенно идентифицируется антициклонический вихрь в северной части залива Посьета, положение которого по алгоритму НЕРТА совпадает в обоих источниках. При этом на глубине 5 м модельные скорости систематически превышают геострофические, тогда как на горизонте 10 м различия сглаживаются. Это повторяющееся поведение

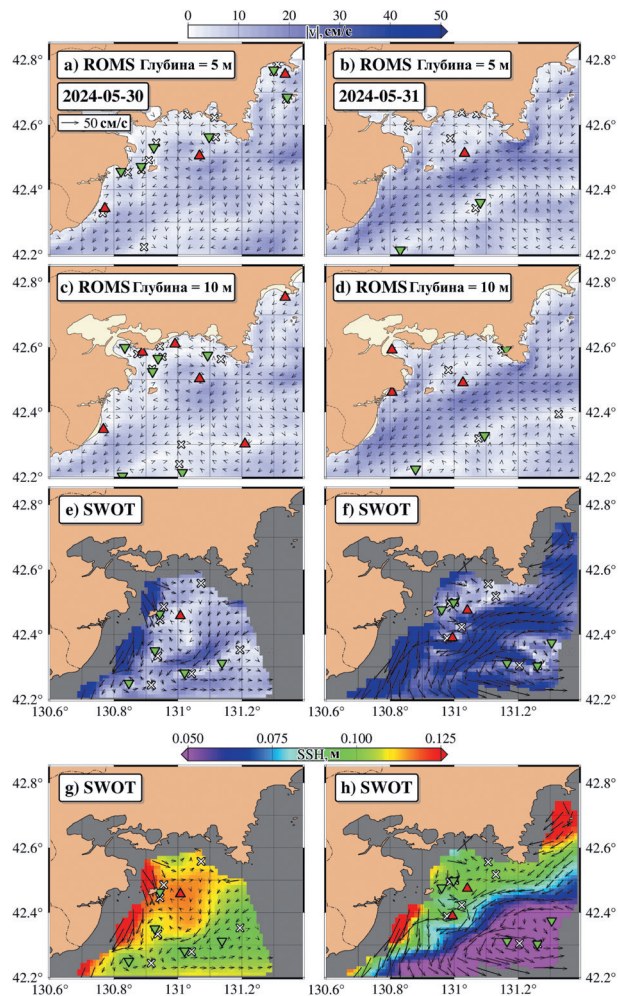


Рис. 2. Сравнение полей поверхностных течений в заливе Посыета по данным спутниковой альтиметрии SWOT и модели ROMS для эпизодов 30 мая 2024 г. (слева) и 31 мая 2024 г. (справа). *a-d*) поле полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 м (*a*) и 10 м (*b*); *e, f*) поле геострофических скоростей, рассчитанных по данным SWOT.

Цветовая шкала показывает величины скоростей (*a-f*) и уровень океана (SSH, Sea Surface Height) (*g, h*). Красными треугольниками ▲ показаны центры антициклонов, зелеными ▼ — циклонов определённые методом НЕРТА. Крестики × соответствуют гиперболическим точкам.

Fig. 2. Comparison of surface current fields in Posyet Bay from SWOT satellite altimetry and ROMS model for episodes of May 30, 2024 (left) and May 31, 2024 (right).

a-d) full velocity field from ROMS at depths of 5 m (*a*) and 10 m (*b*);
e, f) geostrophic velocity field calculated from SWOT data.

Color scale shows velocity magnitudes (*a-f*) and sea surface height (SSH) (*g, h*). Red triangles ▲ mark anticyclone centers, green ▼ — cyclone centers identified by the HEPTA method. Crosses × correspond to hyperbolic points.

однозначно указывает на то, что дополнительная составляющая в ROMS имеет дрейфовую (экмановскую) природу и затухает с глубиной, что согласуется с теорией ветрового трения.

Рис. 3 подтверждает выводы, сделанные по майским данным, и демонстрирует, что наблюдаемое расхождение скоростей не является случайным артефактом, а представляет собой устойчивую физическую закономерность. Это служит надёжным мостиком между спутниковыми наблюдениями и моделированием: SWOT обеспечивает независимую верификацию барической части, а ROMS восполняет недостающую дрейфовую компоненту, позволяя в дальнейшем корректно диагностировать механизмы вихреобразования по полным скоростям.

Таким образом, представленный комплексный подход позволяет не только верифицировать ROMS, но и получить количественную оценку вклада ветрового дрейфа в поверхностные течения, что невозможно сделать, используя только один из методов. Это служит основой для корректного анализа механизмов вихреобразования в следующем разделе.

Вихреобразование в заливе Посъета по результатам моделирования

На рис. 2 и рис. 3 представлены два эпизода формирования антициклонических вихрей в заливе Посъета у мыса Гамова. Первый эпизод происходил в период с 26 по 30 мая 2024 г. Ветровая обстановка над исследуемой областью была следующая: в первой половине 26 мая над западной частью залива Петра Великого наблюдался южный сильный ветер, во второй половине 26 мая сильный южный ветер сменился на крепкий восточный (здесь и далее используются словесные определения силы ветра из шкалы Бофорта). При этом усиливалось Приморское течение в западной части залива Петра Великого и дрейфовое течение в северном направлении. Ослабление ветра в первой половине 27 мая привело к компенсационному сгоновому течению, которое на поверхности восточной части залива Петра Великого направлено на юг и проявляется как усиление потока вдоль западного побережья Амурского залива. Таким образом, сильный ветер, который в течение 26 мая сменил направление с южного на восточный, привел к усилению поверхностных течений в районе мыса Гамова, направленных на юго-запад. Это течение наблюдалось в период с 27 до 30 мая и прослеживалось от района о. Римского-Корсакова до выхода из залива Петра Великого, минуя устье реки Туманной. Скорость течений 27 мая достигала 40 см/с, к 30 мая уменьшилась до 10 см/с с кратковременными пульсационными усилениями каждые сутки до 30 см/с.

Антициклоническая циркуляция начала формироваться в первой половине 27 мая в северной части залива Посъет на северной периферии вышеупомянутого течения. Во второй половине 27 мая эта циркуляция формируется в отдельный вихрь, который визуальнo прослеживается в полях течений до 31 мая. В течение четырех суток своей жизни его диаметр достигал 20 км. Вихрь распался во время следующего усиления восточного ветра в период 30—31 мая, и на его месте начал формироваться уже следующий антициклонический вихрь.

Похожая метеорологическая ситуация наблюдалась во время второго эпизода, который происходил в период с 19 по 23 августа. Усиление восточного ветра

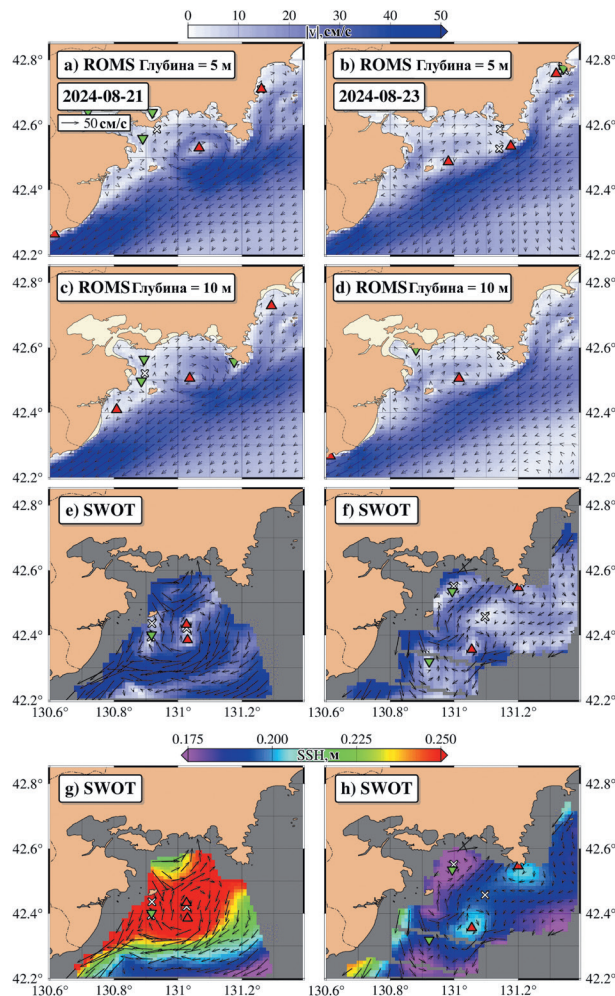


Рис. 3. Сравнение полей поверхностных течений в заливе Посыета по данным спутниковой альтиметрии SWOT и модели ROMS для эпизодов 21 августа 2024 г. (слева) и 23 августа 2024 г. (справа). *a-d*) поле полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 м (*a*) и 10 м (*b*); *e, f*) поле геострофических скоростей, рассчитанных по данным SWOT.

Цветовая шкала показывает величины скоростей (*a-f*) и уровень океана (SSH, Sea Surface Height) (*g, h*). Красными треугольниками ▲ показаны центры антициклонов, зелеными ▼ — циклонов определённые методом НЕРТА. Крестики × соответствуют гиперболическим точкам.

Fig. 3. Comparison of surface current fields in Posyet Bay from SWOT satellite altimetry and ROMS model for episodes of August 21, 2024 (left) and August 23, 2024 (right).

a-d) full velocity field from ROMS at depths of 5 m (*a*) and 10 m (*b*);
e, f) geostrophic velocity field calculated from SWOT data.

Color scale shows velocity magnitudes (*a-f*) and sea surface height (SSH) (*g, h*). Red triangles ▲ mark anticyclone centers, green ▼ — cyclone centers identified by the HEPTA method. Crosses × correspond to hyperbolic points.

19 августа привело к усилению юго-западного течения в западной части залива Петра Великого, и к формированию антициклонического вихря 20 августа. Этот вихрь прослеживался до 22 августа, когда проходящий через акваторию залива Петра Великого тайфун JONGDARI перемешал верхний слой, что привело к диссипации антициклонического вихря.

Детальный анализ формирования антициклонических вихрей в северной части залива Посьета показал схожие механизмы. Усиление ветров восточных направлений приводит к усилению юго-западного течения в западной части залива Петра Великого, что, в свою очередь, приводит к формированию антициклонического вихря в северной части залива Посьета. Таким образом, основным физическим механизмом формирования подобного рода вихрей является инерционная неустойчивость, появляющаяся вследствие интенсификации горизонтального градиента скорости течения. Важно, что идентификация этого механизма стала возможной именно благодаря верифицированной модели, поскольку данные SWOT сами по себе не дают полного поля скорости и не позволяют рассчитать градиенты полных течений, необходимые для диагностики неустойчивости. Комплексный подход обеспечил надёжное выделение вихрей и последующий анализ их происхождения.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1) Показано, что данные спутниковой альтиметрии SWOT, несмотря на их высокое разрешение, дают только геострофическую (барическую) компоненту скорости, которая в мелководном прибрежном районе не отражает полного течения из-за существенной дрейфовой составляющей, связанной с ветром. Визуальное сопоставление полей абсолютной динамической топографии и геострофических скоростей из SWOT с полями модели ROMS для эпизодов 30—31 мая и 21—23 августа 2024 г. подтвердило, что модель адекватно воспроизводит барическую часть циркуляции (положение и структуру вихрей совпадают). Различия в амплитудах скоростей на горизонте 5 м обусловлены именно учётом в модели дрейфовой компоненты, которая затухает на глубине 10 м, что согласуется с физикой экмановского слоя. Это демонстрирует, что SWOT является эффективным инструментом для верификации барической составляющей региональных моделей, но не может использоваться как самостоятельный источник данных о полных течениях.

2) На основе верифицированной модели ROMS идентифицированы антициклонические вихри в заливе Посьета, возникающие в периоды усиления восточных ветров. Показано, что их генерация обусловлена инерционной неустойчивостью, развивающейся при интенсификации горизонтального градиента скорости юго-западного течения. Пространственные масштабы (десятки км) и время жизни (несколько суток) подтверждают их субмезомасштабную природу. Без привлечения модели, которая учитывает полное поле скорости, диагностика типа неустойчивости была бы невозможна.

3) Разработанная методология совместного анализа SWOT и ROMS позволяет разделить барический и дрейфовый вклады в поверхностные течения, что

критически важно для корректной интерпретации альтиметрических данных в прибрежных акваториях. Этот подход может быть рекомендован для валидации других региональных моделей и для изучения субмезомасштабных процессов в районах, где традиционная альтиметрия малоэффективна. В качестве прикладного примера показано, что идентифицированные вихри способны переносить загрязнённые воды реки Туманной в северо-восточном направлении, что создаёт экологические риски для Дальневосточного морского заповедника, однако главный вклад работы заключается в методологическом аспекте.

Список литературы

1. Tishchenko P. Y., Tishchenko P. P., Lobanov V. B. et al. Impact of the transboundary Razdolnaya and Tumannaya Rivers on deoxygenation of the Peter the Great Bay (Sea of Japan) // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. Vol. 239. 106731. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106731.
2. Wang S. I., Wang D., Yang X.h. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin // *Chinese Geographical Science*. 2002. Vol. 12. P. 273—281. doi: 10.1007/s11769-002-0014-z.
3. Tkalin A. V., Shapovalov E. N. Influence of Typhoon Judy on chemistry and pollution of the Japan Sea coastal waters near the Tumangan River mouth // *Ocean Research*. 1991. Vol. 13. P. 95—101.
4. Vyshkvartsev D. I., Lebedev E. B. The project of economic development of the Tumangan River is dangerous for shallow water ecosystems of Posyet Bay, Sea of Japan // *Russian Journal of Marine Biology*. 1997. Vol. 1. P. 51—55.
5. Stunzhas P. A., Tishchenko P. Y., Ivin V. V. et al. The first case of anoxia in waters of the Far East Marine Biosphere Reserve // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 467. P. 295—298. doi: 10.1134/S1028334X16030144.
6. Fayman P. A., Salyuk P. A., Budyansky M. V. et al. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 194. 115414. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.
7. Prants S. V., Fayman P. A., Budyansky M. V. et al. Simulation of winter deep slope convection in Peter the Great Bay (Japan Sea) // *Fluids*. 2022. Vol. 7. 134. doi: 10.3390/fluids7040134.
8. Григорьева Н. И., Мощенко А. В., Пропп Л. Н. и др. Изучение переноса вод и гидрохимических условий района к северу от устья реки Туманной // *Известия ТИНРО*. 1998. Т. 123. С. 423—430.
9. Навроцкий В. В., Дубина В. А., Павлова Е. П. и др. Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 158—170. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170.
10. Vanin N. S., Moshchenko A. V., Feldman K. L. et al. Simplified numerical model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman River solid run-off // *Ocean Research*. 2000. Vol. 22. P. 81—90.
11. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., et al. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter // *Ocean Dynamics*. 2019. Vol. 69. P. 443—462. doi: 10.1007/s10236-019-01252-8.
12. Fayman P., Prants S., Budyansky M. et al. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis // *Continental Shelf Research*. 2019. Vol. 181. P. 143—155. doi: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
13. Morrow R., Fu L.-L., Arduin F. et al. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. 232. doi: 10.3389/fmars.2019.00232.
14. Fu L.-L., Pavelsky T., Crétaux J.-F. et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51. e2023GL107652. doi: 10.1029/2023GL107652.
15. Nencioli F., Dibarboure G. et al. An altimeter-based assessment of SWOT KaRIn spectral error requirements // *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 76. No. 3. doi: 10.1016/j.asr.2025.05.073.

16. Gómez-Enri J., Arribas-Rodríguez B., Tejedor B. et al. Validation of the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) KaRIn Sea Level Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2026. Vol. 64. P. 1—11. doi: 10.1109/TGRS.2026.3679467.
17. Shchepetkin A. F., McWilliams J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // *Ocean Modelling*. 2005. Vol. 9. P. 347—404. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
18. Haidvogel D. B., Arango H. G., Hedstrom K. et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2000. Vol. 32. P. 239—281. doi: 10.1016/S0377-0265(00)00049-X.
19. Marchesiello P., McWilliams J.C., Shchepetkin A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33. P. 753—783. doi: 10.1175/1520-0485(2003)033<753:ESADOT>2.0.CO;2.
20. Peliz A., Dubert J., Haidvogel D. B. et al. Generation and propagation of submesoscale eddies in the Iberian upwelling system // *Journal of Marine Research*. 2003. Vol. 61. P. 621—646. doi: 10.1357/002224003322621236.
21. Dinniman M. S., Klinck J. M., Smith W. O. Cross-shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2003. Vol. 50. P. 3103—3120. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011.
22. Budgell W. P. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region // *Ocean Dynamics*. 2005. Vol. 55. P. 370—387. doi: 10.1007/s10236-005-0008-3.
23. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G. et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method // *Ocean Modelling*. 2005. Vol. 8. P. 81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
24. Warner J. C., Geyer W. R., Lerczak J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. C05001. doi: 10.1029/2004JC002691.
25. Wilkin J. L., Arango H. G., Haidvogel D. B. et al. A regional ocean modeling system for the Long-term Ecosystem Observatory // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. C06S91. doi: 10.1029/2003JC002218.
26. Song Y., Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system // *Journal of Computational Physics*. 1994. Vol. 115. P. 228—244. doi: 10.1006/jcph.1994.1189.
27. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model // *Ocean Modelling*. 2004. Vol. 7. P. 227—258. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.11.001.
28. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. An adjoint sensitivity analysis of the Southern California Current circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36. P. 1765—1787. doi: 10.1175/JPO2929.1.
29. Fairall C. W., Bradley E. F., Rogers D. P. et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment // *Journal of Geophysical Research*. 1996. Vol. 101. P. 3747—3764. doi: 10.1029/95JC03205.
30. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. Vol. 83. P. 1631—1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
31. Bentamy A., & Fillon D. C. Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements // *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. P. 1729—1754. doi: 10.1080/01431116.2011.600348.
32. Miyazawa Y., Varlamov S. M., Miyama T. et al. Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 713—728. doi: 10.1007/s10236-017-1056-1.
33. Flather R. A. A tidal model of the north-west European continental shelf // *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*. 1976. Vol. 6. P. 141—164.
34. Chapman D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. Vol. 15. P. 1060—1075. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<1060:NTOC&SO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1060:NTOC&SO>2.0.CO;2).
35. Udalov A. A., Uleysky M. Yu. Hyperbolic and elliptic points tracking algorithm (HEPTA) in two-dimensional non-stationary velocity fields defined on a discrete grid // *Communications*

- in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2025. Vol. 152 (B). Art. no. 109208. doi: 10.1016/j.cnsns.2025.109208.
36. Budyansky M. V., Udalov A. A., Uleysky M. Yu. et al. Comparative analysis of vortex dynamics: Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm – HEPTA vs. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm – AMEDA // *Ocean Modelling*. 2026. Vol. 203. 102765. doi: 10.1016/j.oceanmod.2026.102765.
 37. Sandalyuk N. V., Khachatryan E. M. Comparative Analysis of Eddies in Open Ocean and Marginal Ice Zone Using SWOT and Sentinel-1 Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2026. No. 1. doi: 10.2205/2026es001081.
 38. Липинская Н. А., Салюк П. А. Анализ гидробиологических и гидрооптических характеристик в субмезомасштабных вихрях залива Петра Великого по одновременным натурным и спутниковым данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 3. С. 111—122. doi: 10.7868/S2073667321030102.
 39. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 5600. doi: 10.3390/rs15235600.

References

1. Tishchenko P. Y., Tishchenko P. P., Lobanov V. B., et al. Impact of the transboundary Razdolnaya and Tumannaya Rivers on deoxygenation of the Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020; (239):106731. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106731.
2. Wang S. I., Wang D., Yang X.h. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin. *Chinese Geographical Science*. 2002; (12):273—281. doi: 10.1007/s11769-002-0014-z.
3. Tkalin A. V., Shapovalov E. N. Influence of Typhoon Judy on chemistry and pollution of the Japan Sea coastal waters near the Tumangan River mouth. *Ocean Research*. 1991; (13):95—101.
4. Vyshkvartsev D. I., Lebedev E. B. The project of economic development of the Tumangan River is dangerous for shallow water ecosystems of Posyet Bay, Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology*. 1997; (1):51—55.
5. Stunzhas P. A., Tishchenko P. Y., Ivin V. V., et al. The first case of anoxia in waters of the Far East Marine Biosphere Reserve. *Doklady Earth Sciences*. 2016; (467):295—298. doi: 10.1134/s1028334x16030144.
6. Fayman P. A., Salyuk P. A., Budyansky M. V., et al. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output. *Marine Pollution Bulletin*. 2023; (194):115414. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.
7. Prants S. V., Fayman P. A., Budyansky M. V., et al. Simulation of winter deep slope convection in Peter the Great Bay (Japan Sea). *Fluids*. 2022; (7):134. doi: 10.3390/fluids7040134.
8. Grigorieva N. I., Moshchenko A. V., Propp L.N., et al. Study of water transport and hydrochemical conditions in the area north of the Tumen River mouth. *Izvestiya TINRO = Proceedings of TINRO*. 1998; (123): (423—430). (In Russ.).
9. Navrotskiy V. V., Dubina V. A., Pavlova E. P., et al. Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019; 16(1): (158—170). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170. (In Russ.).
10. Vanin N. S., Moshchenko A. V., Feldman K. L., et al. Simplified numerical model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman River solid run-off. *Ocean Research*. 2000; (22):81—90.
11. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., et al. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter. *Ocean Dynamics*. 2019; (69): 443—462. doi: 10.1007/s10236-019-01252-8.
12. Fayman P., Prants S., Budyansky M., et al. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis. *Continental Shelf Research*. 2019; (181): 143—155. doi: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
13. Morrow R., Fu L.-L., Arduin F., et al. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Frontiers in Marine Science*. 2019; (6):232. doi: 10.3389/fmars.2019.00232.

14. Fu L.-L., Pavelsky T., Crétaux J.-F., et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water. *Geophysical Research Letters*. 2024; (51):e2023GL107652. doi: 10.1029/2023GL107652.
15. Nencioli F., Dibarboure G., et al. An altimeter-based assessment of SWOT KaRIn spectral error requirements. *Advances in Space Research*. 2025;76(3). doi: 10.1016/j.asr.2025.05.073.
16. Gómez-Enrí J., Arribas-Rodríguez B., Tejedor B., et al. Validation of the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) KaRIn Sea Level Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2026; (64):1—11. doi: 10.1109/TGRS.2026.3679467.
17. Shchepetkin A. F., McWilliams J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*. 2005; (9): 347—404. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
18. Haidvogel D. B., Arango H. G., Hedstrom K., et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2000; (32): 239—281. doi: 10.1016/S0377-0265(00)00049-X.
19. Marchesiello P., McWilliams J. C., Shchepetkin A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*. 2003; (33): 753—783. doi: 10.1175/1520-0485(2003)033<753:ESADOT>2.0.CO;2.
20. Peliz A., Dubert J., Haidvogel D. B., et al. Generation and propagation of submesoscale eddies in the Iberian upwelling system. *Journal of Marine Research*. 2003; (61): 621—646. doi: 10.1357/002224003322621236.
21. Dinniman M. S., Klinck J. M., Smith W.O. Cross-shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2003; 50: 3103—3120. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011.
22. Budgell W. P. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region. *Ocean Dynamics*. 2005; 55: 370—387. doi: 10.1007/s10236-005-0008-3.
23. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G., et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005; (8):81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
24. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G., et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005; (8):81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
25. Wilkin J. L., Arango H. G., Haidvogel D. B., et al. A regional ocean modeling system for the Long-term Ecosystem Observatory. *Journal of Geophysical Research*. 2005; (110):C06S91. doi: 10.1029/2003JC002218.
26. Song Y., Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of Computational Physics*. 1994; (115):228—244. doi: 10.1006/jcph.1994.1189.
27. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. *Ocean Modelling*. 2004; (7):227—258. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.11.001.
28. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. An adjoint sensitivity analysis of the Southern California Current circulation. *Journal of Physical Oceanography*. 2006; (36):1765—1787. doi: 10.1175/JPO2929.1.
29. Fairall C. W., Bradley E. F., Rogers D. P., et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research*. 1996; (101):3747-3764. doi: 10.1029/95JC03205.
30. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; (83):1631—1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
31. Bentamy A., Croize Fillon D. Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 2012; (33):1729—1754. doi: 10.1080/01431161.2011.600348.
32. Miyazawa Y., Varlamov S. M., Miyama T. et al. Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 713—728. doi: 10.1007/s10236-017-1056-1.

33. Flather R. A. A tidal model of the north-west European continental shelf. *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*. 1976; (6):141—164.
34. Chapman D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *Journal of Physical Oceanography*. 1985; (15):1060—1075. doi: 10.1175/1520-0485(1985)015<1060:NTOCSSO>2.0.CO;2.
35. Udalov A. A., Uleysky M. Yu. Hyperbolic and elliptic points tracking algorithm (HEPTA) in two-dimensional non-stationary velocity fields defined on a discrete grid. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2025; 152(B):109208. doi: 10.1016/j.cnsns.2025.109208.
36. Budyansky M. V., Udalov A. A., Uleysky M. Yu., et al. Comparative analysis of vortex dynamics: Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm – HEPTA vs. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm – AMEDA. *Ocean Modelling*. 2026; (203):102765. doi: 10.1016/j.oceanmod.2026.102765.
37. Sandalyuk N. V., Khachatryan E. M. Comparative Analysis of Eddies in Open Ocean and Marginal Ice Zone Using SWOT and Sentinel-1 Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. No. 1. doi: 10.2205/2026es001081.
38. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Analysis of hydrobiological and hydrooptical characteristics in submesoscale eddies of Peter the Great Bay based on simultaneous in situ and satellite data. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021; 14(3): (111—122). doi: 10.7868/S2073667321030102. (In Russ.).
39. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay. *Remote Sensing*. 2023; (15):5600. doi: 10.3390/rs15235600.

Информация об авторах

Дидов Александр Алексеевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; м.н.с., didov.aa@poi.dvo.ru.

Файман Павел Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; в.н.с., pavel.fayman@yandex.ru.

Будянский Максим Васильевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; в.н.с., plaztic@poi.dvo.ru.

Белоненко Татьяна Васильевна, доктор географических наук, профессор кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, btvlisab@yandex.ru.

Information about authors

Alexander A. Didov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Junior Researcher.

Pavel A. Fayman, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Leading Researcher.

Maxim V. Budyansky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Leading Researcher.

Tatyana V. Belonenko, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Oceanology, St. Petersburg State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.07.2026

Принята в печать 30.08.2026

The article was received on 17.07.2026

The article was accepted on 30.08.2026