

Анализ мезомасштабной вихревой структуры по данным мультиспектральных спутниковых и гидрологических измерений в Авачинском заливе в летний период 2024 г.

М. В. Врублевский¹, А. А. Коник², О. А. Атаджанова²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

² Институт океанологии им. П. П. Shirshova РАН, Москва, 117997, Россия

В ходе проведения исследований получены пространственные и временные характеристики антициклонического мезомасштабного вихря в Авачинском заливе с помощью широкого ряда спутниковых сенсоров и квазиподспутниковых гидрологических измерений. С помощью данных сенсоров космического базирования проанализировано развитие характеристик вихря (пространственных размеров и положения, влияния на поле температуры поверхности моря и концентрации взвешенных веществ, хлорофилла) с момента его появления в Авачинском заливе (05.07.2024) до момента окончания периода времени (13.08.2024), который можно считать квазисовременным *in situ* измерениям. На момент проведения измерений эффективный радиус вихря достиг 78 км, площадь — 9600 км², а температура поверхности моря в вихре отличалась от внешних вод на 1–2 °С. По результатам анализа данных гидрологической съёмки дана оценка влияния исследуемого вихря на гидрологическую структуру вод Авачинского залива. Вихрь заглубляет холодный промежуточный слой, температура которого на верхней и нижней границе была 3,4 °С, на 142 м. Комплексный анализ дистанционных и *in situ* данных позволил оценить глубину вихря (495 м) и объём (2263 км³). Построение полей солёности и температуры позволило оценить изменение структуры вод Авачинского залива под влиянием вихря: полученные изотермы и изогалины имеют характерную параболическую форму. Исследуемый антициклонический вихрь имеет холодное ядро в поле температуры морской поверхности, что является относительно редким явлением в Мировом океане, отчего его комплексное исследование вносит весомый вклад в изучение подобных явлений.

Ключевые слова: мезомасштабный вихрь, спутниковая альтиметрия, SWOT, Sentinel-3, OLCI, MODIS, *in situ*, гидрологические измерения, Авачинский залив, Тихий океан

Одобрена к печати: 29.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-260-273

Введение

Мезомасштабные вихри являются распространённым явлением в Мировом океане и представляют собой когерентные структуры с горизонтальным масштабом порядка 20–100 км и временем существования от нескольких суток до месяцев (Chelton et al., 2011; Zhou et al., 2021). Такие структуры могут быть квазистационарными или, наоборот, далеко распространяться от места зарождения, транспортируя при этом массу, импульс, соль, тепло, химические и биологические компоненты на большие расстояния (Itoh, Yasuda, 2010; Prants et al., 2016, 2017; Rogachev et al., 2007; Ueno et al., 2023).

Восточно-Камчатское течение, являющееся пограничным течением субполярного круговорота в северной части Тихого океана (Шлык, Rogachev, 2016; L'Her et al., 2021) (рис. 1, см. с. 261), способствует образованию большого числа антициклонических мезомасштабных вихревых структур вдоль побережья полуострова (Rogachev, Шлык, 2006; Романов и др., 2009). Общая циркуляция вод в регионе характеризуется постоянным взаимодействием таких структур с западными приграничными течениями (L'Her et al., 2021).

Наиболее интересным районом в описанном регионе в силу близости к морскому порту и будучи местом работ рыбопромысловой отрасли является Авачинский залив. Океанографические условия в Авачинском заливе — уникальные с точки зрения вертикальной структуры. Она формируется в результате взаимодействия сложной системы приливно-отливных и геострофических течений, водообменом с открытой частью Тихого океана и отличается

водными массами различного генезиса (Ueno, Yasuda, 2000). Термическая структура вод в большей части залива представляет собой воды субарктического типа с относительно тонким перемешанным поверхностным слоем, холодным подповерхностным (ХПС) и тёплым промежуточными слоями (Ванин, 2017; Тепнин, 2022). Такие океанографические условия благоприятны для развития вихревых структур разного масштаба.

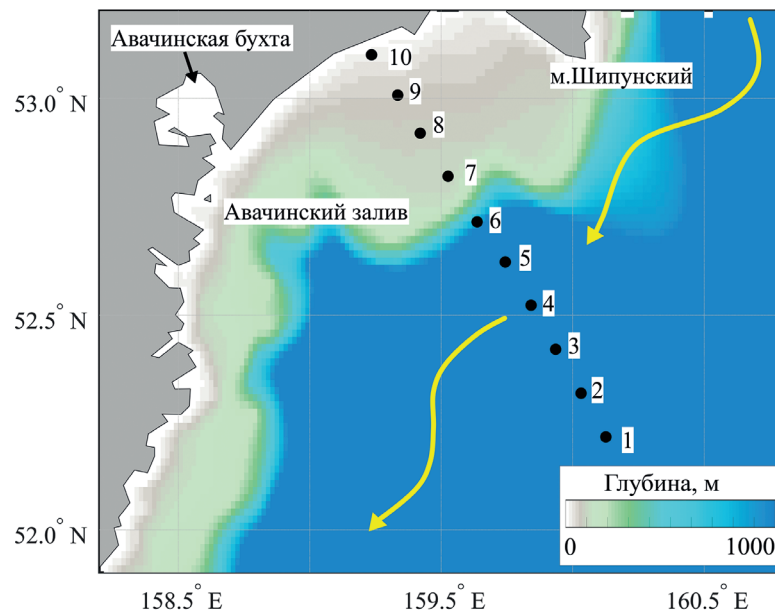


Рис. 1. Карта батиметрии района исследования. Цифрами обозначены номера станций *in situ* измерений, жёлтыми стрелками — направление Восточно-Камчатского течения

Мезомасштабная динамика в Авачинском заливе характеризуется постоянным наличием квазистационарных мезомасштабных вихрей (Зимин и др., 2024; Пранц, 2021; Тепнин, 2022; Шлык, Рогачев, 2016).

До недавнего времени было широко распространено мнение, что антициклонические вихри имеют тёплое ядро. При этом в актуальных работах (например, (Moschos et al., 2022)) говорят и о существовании так называемых антициклонических вихрей с холодным ядром (ABX). В период с 1993 по 2017 г., согласно исследованию (Sun et al., 2019), в северной части Тихого океана наблюдались лишь 6,1 % ABX из общего числа 5 658 354 антициклонических вихрей. При этом район вблизи Авачинского залива, согласно всё той же работе, является одним из наиболее продуктивных на появление ABX (около 186 ABX в год), а период наиболее частых формирований ABX — июль — август.

Анализ вихрей Авачинского залива в большей мере проводился дистанционными методами. Использование различных спутниковых сенсоров позволяет получить широкий набор характеристик вихря. При этом данные оптических сенсоров не регулярны из-за облачности, автоматическое обнаружение вихрей с применением данных о температуре поверхности моря и цвете поверхности океана подвержено ложным срабатываниям (Marcello et al., 2015). Видимость явлений в океане на радиолокационных изображениях (РЛИ) также ограничена и зависит от скорости ветра. Карты альтиметрии имеют низкое пространственное разрешение, отчего хуже регистрируются вихревые структуры с диаметром менее 40–50 км (Du et al., 2019), а также возникают ошибки детектирования их положения. Кроме того, дистанционные методы не позволяют оценить вертикальные размеры и структуру, которые можно получить лишь контактными измерениями, ограниченными во времени и пространстве в силу их дорогостоящего проведения. Поэтому наиболее информативный вариант изучения вихрей в океане — это комплексный анализ данных контактных и дистанционных измерений различных сенсоров.

В настоящей работе на основе комплексного использования спутниковых данных и *in situ* наблюдений даны количественные оценки и описание пространственной изменчивости квазистационарного антициклонического мезомасштабного вихря, зарегистрированного в ходе проведения экспедиционных исследований в рамках программы «Плавучий университет-2024» в августе 2024 г. в Авачинском заливе. А так как, согласно публикации (Sun et al., 2019), эволюции развития вихрей с тепловыми аномалиями имеют существенные различия, изучение их трёхмерной структуры имеет большую актуальность.

Материалы и методы

Для исследования мезомасштабной вихревой структуры в Авачинской заливе в июле – августе 2024 г. применялся мультисенсорный подход.

Для изучения поверхностных характеристик вихря и траектории его движения за период исследования использовались данные из атласа META 3.2 (*англ.* Mesoscale Eddy Trajectory Atlas), распространяемого французским Центром архивных данных спутниковых миссий альтиметрии AVISO (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) (<https://www.aviso.altimetry.fr>). В атласе содержится информация об океанических вихрях и их основных параметрах: координатах центра; эффективных радиусах; эффективных контурах (границы вихрей); амплитудах, т.е. разнице между экстремумом высоты морской поверхности внутри вихря и на периферии; геострофических скоростях — на каждый день идентификации вихря (Pegliasco et al., 2022).

Дополнительно привлекались карты данных спутниковой альтиметрии: ежедневные поля абсолютной динамической топографии (АДТ) и скорости геострофических течений (абсолютные и аномалии) на сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. Данные были получены из продукта SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_008_046 (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_008_046), доступного на портале службы мониторинга морской среды CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service).

Помимо этого, использованы данные альтиметрии миссии SWOT из продукта SWOT L3_LR_SSH_Expert (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/swot-l3-ocean-products.html>), распространяемые AVISO. Этот продукт предоставляет информацию вдоль трека в пределах полосы шириной 120 км с пространственным разрешением 2×2 км с периодом повторного наблюдения 21 день об аномалиях высоты морской поверхности SSHA (*англ.* Sea Surface Height Anomalies). За даты наблюдений было проанализировано девять наборов данных.

Вихри в полях АДТ и SSHA (в отдельных случаях) определяются как замкнутые округлые области положительных (для антициклонических вихрей) или отрицательных (для циклонических) аномалий значений этих параметров, а геострофические скорости течения отображают скорость и направление течений вихря на поверхности.

Для оценки температуры на границе и внутри вихря использовались данные о температуре морской поверхности SST (*англ.* Sea Surface Temperature) спектро радиометров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua. Данные были проанализированы с помощью сервиса «Вега-Science» (Лупян и др., 2021), входящего в состав Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Вихри в поле SST проявляются как концентрические спиральные структуры аномалий температуры поверхности моря.

Кроме этого, использовались данные о биооптических параметрах вод. Данные о концентрации хлорофилла *a* за отдельные даты получены с помощью алгоритма OC2 (O'Reilly et al., 2000) по спутниковым снимкам высокого разрешения (10 м) сенсоров MSI (*англ.* Multi Spectral Instrument) Sentinel-2A, -2B. Также использованы данные о концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные по алгоритмам CHL_OC4ME и CHL_NN по измерениям спектрометра OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) Sentinel-3, имеющего 21 канал на длинах волн от 400 до 1020 нм и пространственное разрешение 300 м. Информация о концентрации содержится в продукте OL_2_WFR (<https://navigator.eumetsat.int/product/>

EO:EUM:DAT:SENTINEL-3:OL_2_WFR__NRT). Также в продукте содержится информация о взвешенном (алгоритм ADG443_NN) и окрашенном растворённом органическом веществе (алгоритм ADG443_NN) и коэффициенте диффузного ослабления Kd490 на длине волны 490 нм (алгоритм KD490_M07).

Для уточнения границ вихря дополнительно за отдельные даты привлекались РЛИ радиолокатора с синтезированной апертурой, работающего в С-диапазоне спутников Sentinel-1A, -1B. Всего было проанализировано 12 сцен РЛИ в исследуемый период.

Для анализа гидрологической структуры вод мезомасштабного вихря в Авачинском заливе с 6 по 8 августа 2024 г. в рамках экспедиции «Тихоокеанский плавучий университет» научно-исследовательского судна «Профессор Мультановский» был выполнен гидрологический разрез, состоящий из 10 станций (см. *рис. 1*). Работы проводились до горизонта 500 м с частотой 6 Гц и последующим осреднением данных по температуре и солёности по глубине с интервалом 1 м.

Горизонтальные характеристики вихря, полученные с помощью данных дистанционного зондирования Земли, были дополнены вертикальными по *in situ* данным. Для определения глубины и объёма вихря его границы были аппроксимированы эллиптическим параболоидом (см., например, (Пранц, 2021; Рогачев, Шлык, 2006)).

На основе полученных горизонтальных и вертикальных размеров проведён анализ трёхмерной структуры вихря. Исходя из того, что анализируемый вихрь имеет радиально-симметричную структуру (см., например, (Yu et al., 2017)), а гидрологические измерения проводились на различных расстояниях до центра, была оценена радиальная структура вихря. Для этого была построена зависимость температуры, солёности и плотности по всем горизонтальным плоскостям сечения вихря с шагом 1 м. Полученные зависимости аппроксимированы полиномиальной функцией.

Результаты

Влияние вихря на топографию морской поверхности

По данным атласа МЕТА 3.2 в даты экспедиционных исследований (06–08.08.2024) в Авачинском заливе существовал только один океанический мезомасштабный вихрь — № 182537, тип вращения — антициклонический. Координаты центра и основные параметры и их эволюция за период с момента его первой идентификации 05.07.2024 до 15.08.2024 приведены на *рис. 2* (см. с. 264). Выбор даты окончания наблюдений 13 августа основывается на том, что координаты центра вихря начиная с 06.08.2024 по 13.08.2024 находятся в пределах окружности с радиусом 6 км (см. *рис. 2a*), что составляет менее 8 % от среднего эффективного радиуса за эти даты.

Анализируя временные ряды изменений параметров вихря, содержащихся в атласе, и скорости перемещения центра, можно выделить три чётко прослеживаемых стадии:

1. Первая — с 05.07.2024 по 13.07.2024.
2. Вторая — с 14.07.2024 по 05.08.2024.
3. Третья — с 06.08.2024 по 13.08.2024.

Выделение стадий основывается на различиях в средних значениях параметров и скорости их изменений, что хорошо иллюстрируется коэффициентами прямых линейных трендов анализируемых параметров (см. *рис. 2б, в*). Рассмотрим развитие параметров для каждой стадии.

Первая стадия характеризуется быстрым ростом всех параметров: эффективный радиус развивается с 23 до 60 км, эффективная площадь — с 800 до 8300 км², амплитуда — с 1,6 до 8,2 см, средняя геострофическая скорость — с 20 до 23,5 см/с. Переход между первой и второй стадией происходит скачкообразным снижением значений. Вторая стадия характеризуется ростом средней геострофической скорости, а также неинтенсивным увеличением эффективной площади, эффективного радиуса и амплитуды высоты морской поверхности.

Переход между второй и третьей стадией также происходит скачкообразно: значение средней геострофической скорости падает на 2 см/с, а значения эффективной площади, эффективного радиуса и амплитуды резко увеличиваются с 5 на 6 августа и до 13 числа остаются практически неизменными — 14 500–13 500 км², 78–76 км, 11–11,5 см соответственно. Третья стадия завершается 13 августа, так как после наблюдается резкий скачок с уменьшением всех параметров.

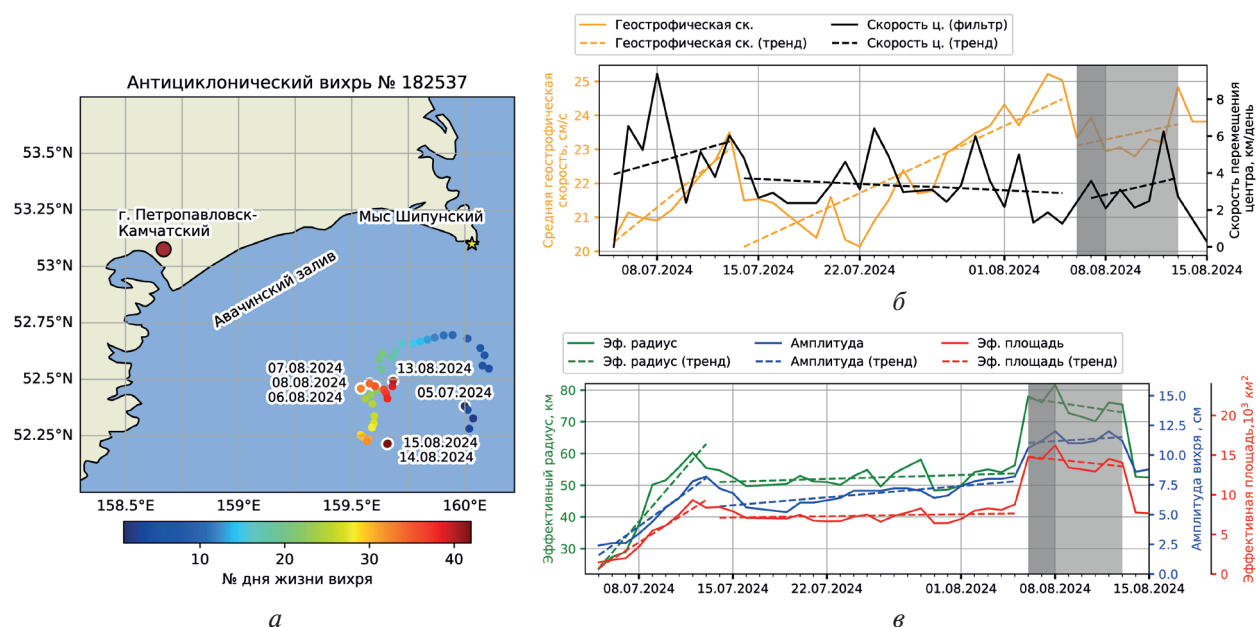


Рис. 2. Эволюция характеристик вихря по данным атласа МЕТА 3.2: *a* — пространственное положение (даты приведены для точек, выделенных белым контуром); *б* — средняя геострофическая скорость и скорость перемещения центра; *в* — эффективные радиус и площадь, амплитуда (светло-серым обозначен временной интервал, в пределах которого спутниковые данные можно считать квазиодновременными проведению *in situ* измерений, чей период проведения отмечен тёмно-серым)

Как было выявлено при сопоставлении границ вихря, выделенных алгоритмом МЕТА 3.2, с тематическими продуктами среднего и высокого разрешения, специфика региона, а также возникающие за мысом Шипунский антициклонические мезомасштабные вихри заостровного типа (образующиеся в результате взаимодействия течения с береговой линией) приводят к существенным ошибкам в автоматическом определении границ вихря. Связано это с тем, что (как видно из рис. 4) изолинии АДТ, хоть и достаточно плотно проходят по границам вихря, выявленным по РЛИ, не замкнуты. А замкнутость линий — один из главных параметров при упомянутом автоматическом детектировании. Поэтому было принято решение построить границы вихря вручную, опираясь на поле АДТ, направления и абсолютные значения скоростей геострофических течений. Выделенные таким образом вручную границы вихря находят большее соответствие с данными высокого разрешения (см. рис. 4–7). К тому же полученные таким методом границы вихря близки к границам, выделяемым по данным альтиметрии SWOT, имеющим пространственное разрешение 2 км.

Так, характеристики поверхностного проявления вихря в поле SSHa (рис. 3, см. с. 265) по данным SWOT за даты наблюдений менялись от 3305 до 9644 км² для площади, от 30 до 59 км для среднего радиуса и от 3 до 11 см для амплитуды SSHa в границах вихря. Максимумы показателей были 07.08.2024 (в даты наблюдений).

В силу низкой регулярности наблюдений исследуемого района спутником SWOT, далее будем использовать границы, выделенные вручную по полю АДТ.

Для уточнения границ вихря, определённых по альтиметрии, были проанализированы 12 РЛИ. Только на двух изображениях за 05.08.2024 была зафиксирована исследуемая вих-

ревая структура. Вихри на РЛИ могут проявляться как области с высоким коэффициентом обратного рассеяния, так и с низким (Du et al., 2019). В данном случае на снимке Sentinel-1A от 05.08.2024 вихрь проявляется в виде узких криволинейных концентрических спиральных полос, стягивающихся к центру, различных отдельно на периферии и образующих практически однородную область пониженного значения коэффициента обратного рассеяния в центральной её части. Регистрация вихря на РЛИ стала возможна за счёт плёночного механизма, который позволяет «видеть» проявления вихрей на поверхности при наличии плёнок биогенного происхождения и скорости ветра до 5–6 м/с (Gade et al., 2013; Johannessen et al., 1994). Наблюдаемая на РЛИ структура (рис. 4) имеет антициклонический тип вращения, поперечный и продольный размер 95 и 193 км и площадь около 8576 км² (при этом часть области вихря не покрыта радиолокационной съёмкой). Площадь, полученная по данным АДТ за ту же дату, — 10 822 км², сопоставима с определённой по РЛИ.

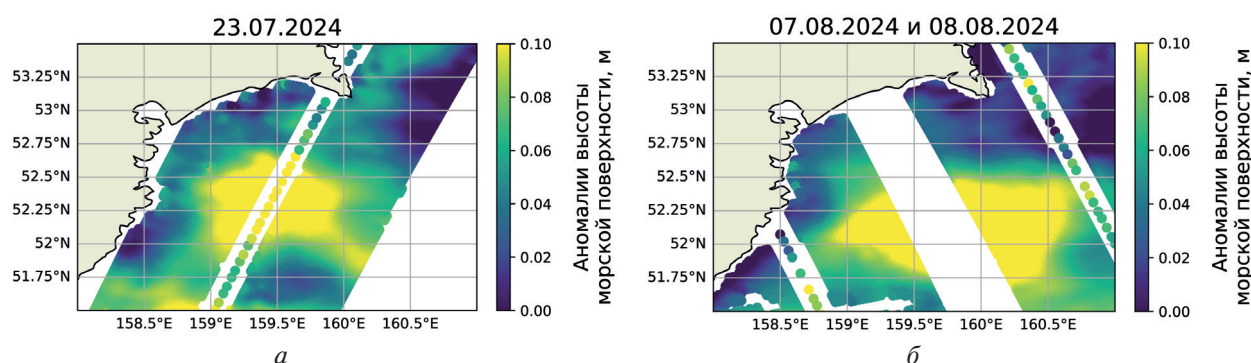


Рис. 3. Пространственное распределение аномалии высоты морской поверхности по данным SWOT: *а* — 23.07.2024; *б* — 07.08.2024 и 07.07.2024

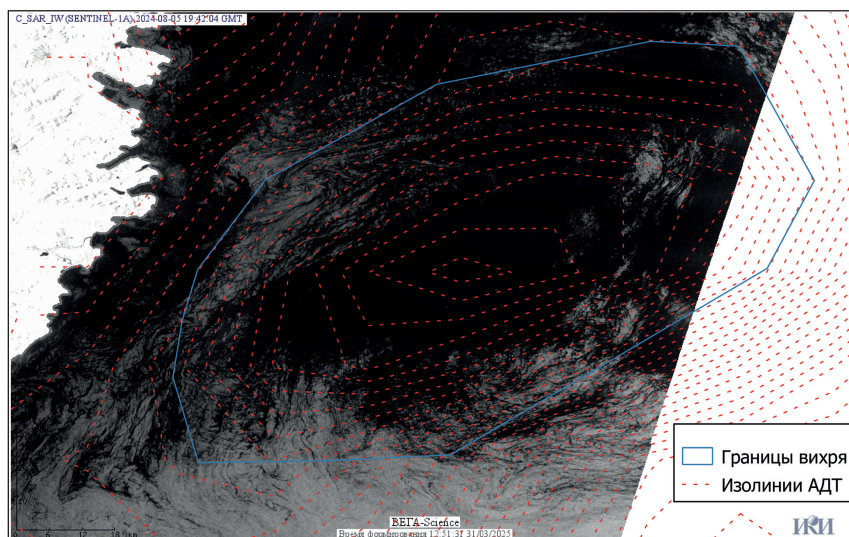


Рис. 4. Радиолокационное изображение SAR Sentinel-1A 05.08.2024 с нанесёнными поверх изолиниями АДТ за ту же дату (шаг 1 см) и определёнными вручную границами вихря по АДТ и полю скорости на основе данных альтиметрии

Влияние вихря на пространственное распределение взвешенных веществ и поле температуры поверхности моря

В пределах границ вихря, определённых по полю АДТ, была подсчитана статистика по концентрации хлорофилла *а* по данным снимка Sentinel-2B за 20.07.2024, полученной алгоритмом OC2. Концентрация находится в диапазоне от 1,06 до 3,44 мг/м³ со средним значением

1,79 мг/м³ и стандартным отклонением 0,09 мг/м³. Пространственное распределение хлорофилла за ту же дату показано на *рис. 5*.

По безоблачным снимкам OLCI за 15.07, 19.07, 20.07, 07.08, 13.08.2024 были проанализированы параметры: концентрация хлорофилла *a*, окрашенного растворённого органического вещества, взвешенного вещества и коэффициент диффузного ослабления. Максимальные значения и дисперсия каждого из параметров были на даты 19–20.07. Исследуемый вихрь хорошо различим в поле хлорофилла, пространственное распределение которого содержит спиральные структуры, отражающие вихревую активность. Области повышенной концентрации хлорофилла *a* соответствуют областям повышенной концентрации взвешенных веществ, а также более высоким значениям коэффициента диффузного затухания на длине волны 490 нм (*рис. 6*, см. с. 267).

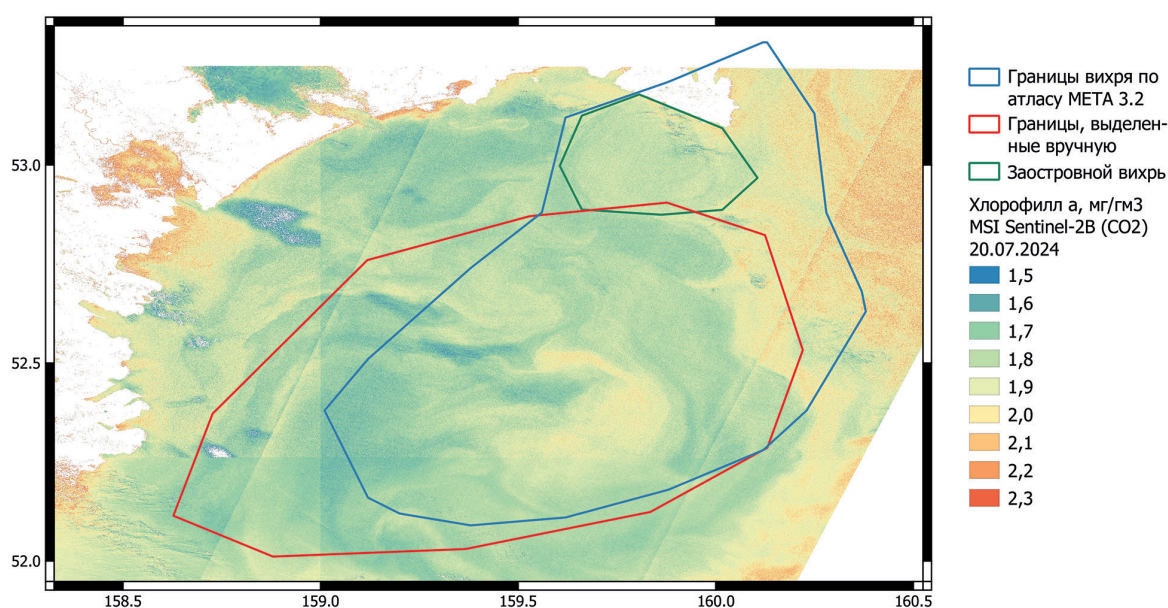


Рис. 5. Поле хлорофилла *a*, полученное с помощью алгоритма OC2 по данным MSI Sentinel-2B 20.07.2024. Линии границ вихрей отмечены за ту же дату

Проявление вихревых структур в описанных выше полях даёт информацию о размерах вихря, пространственных распределениях взвешенных веществ и типе вращения. Зная тип вращения, можно предположить на основе статистических данных характер проявления вихря в поле SST. При этом из-за существования вихрей с тепловыми аномалиями встаёт задача анализа температуры морской поверхности.

За период с 05.07.2024 по 13.08.2024 было 260 сцен наблюдений SST, из них лишь 13 имеют безоблачные участки, позволяющие идентифицировать вихрь.

По результатам анализа поля SST можно заключить: температура на поверхности вод в пределах ядра вихря (центральной области вихря, выступающей аномалией в поле SST) ниже окружающей на 1–2° на протяжении всего периода наблюдения.

С 15.07.2024 по 11.08.2024 в поле SST отмечается чётко выраженное холодное ядро. На дату 15.07 холодное ядро, как хорошо видно из *рис. 7a* (см. с. 267), смещено от центра вихря, определённого по данным АДТ, на юго-восток. Такое обычно объясняется (Amores et al., 2018; Stegner et al., 2021) ошибками карт данных альтиметрии. Можно предположить, что эти ошибки вызваны сложной вихревой структурой (например, в поле хлорофилла *a* на снимке Sentinel-2 от 20.07.2024 00:41:59 (см. *рис. 5*) наблюдается антициклонический вихрь вблизи мыса Шипунский, вероятно, оказывающий влияние на наблюдаемую картину поля АДТ по карте с низким разрешением) и хорошо известной неточностью альтиметрии в прибрежной зоне.

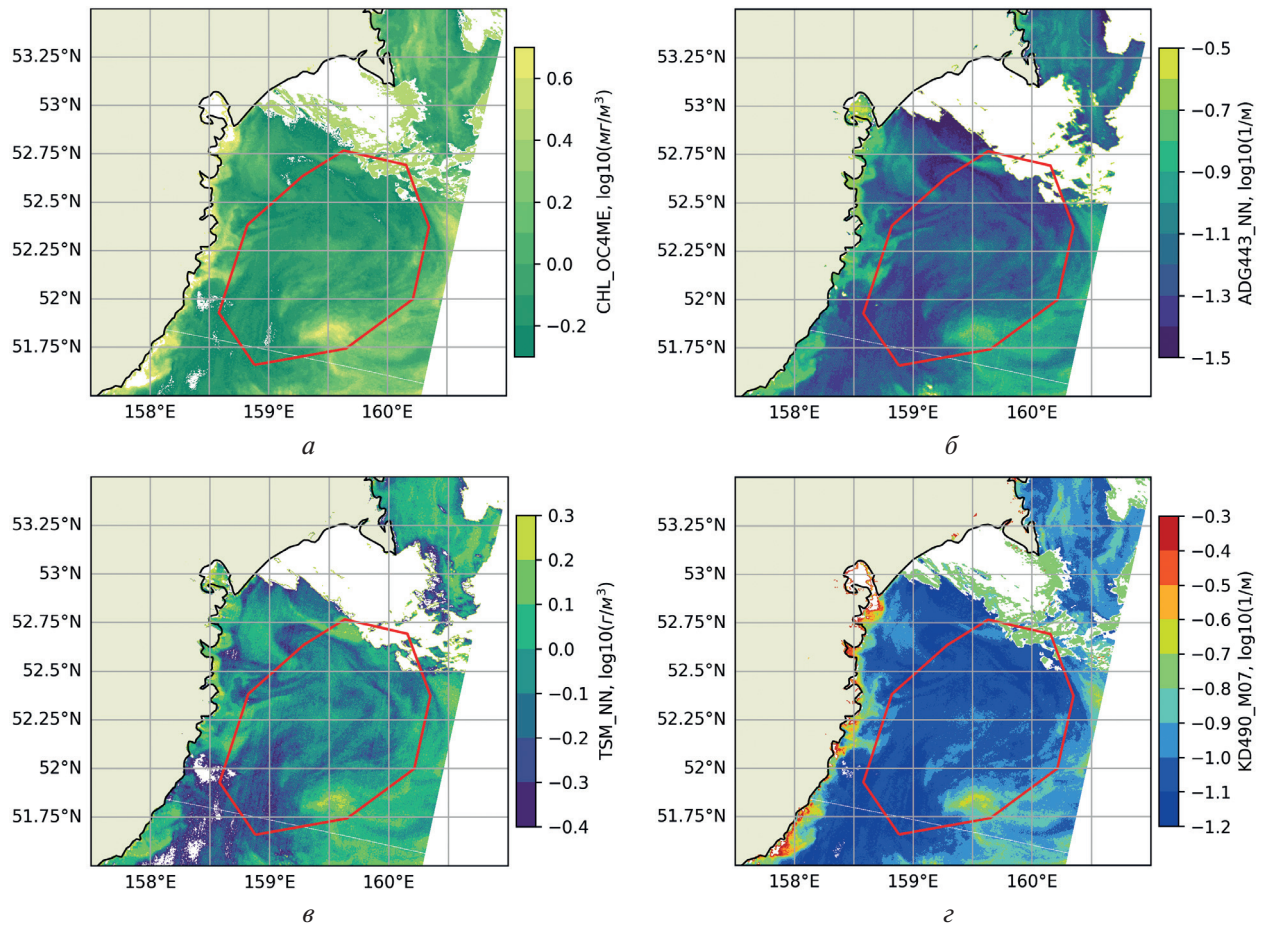


Рис. 6. Пространственное распределение различных характеристик, полученных по безоблачным снимкам OLCI Sentinel-3 за 07.08.2024: *а* — концентрация хлорофилла *а*, алгоритм CHL_OC4ME; *б* — коэффициент поглощения неводорослевых частиц и хромофорного растворённого органического вещества, алгоритм ADG443_NN; *в* — концентрация взвешенного вещества, алгоритм TSM_NN; *г* — коэффициент диффузного ослабления, алгоритм KD490_M07. Красный контур определяет границы вихря, полученные по данным АДТ за даты проведения соответствующих съёмок OLCI Sentinel-3

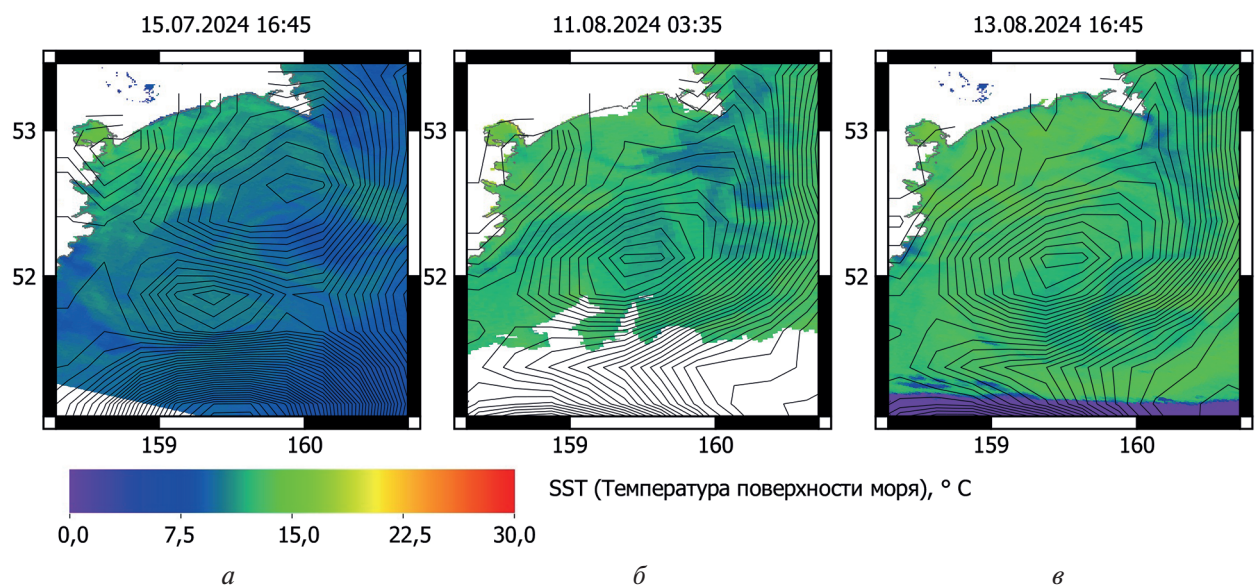


Рис. 7. Поле SST по данным MODIS за разные даты наблюдения. Чёрными ломанными показаны изолинии АДТ с шагом 1 см за даты наблюдений SST

Начиная с 04.08.2024 в поле SST наблюдается появление холодных вод вблизи мыса Шипунский (вероятно, меандра холодного течения, протекающего через весь Кроноцкий залив, расположенный северо-восточнее рассматриваемого района) с температурой около $9,5^{\circ}\text{C}$ и протяжённостью примерно 105 км на юго-юго-восток от мыса, которые захватываются периферией вихря. До даты 11.08.2024 включительно по данным SST эти холодные воды достаточно локализованы в области с размерами 100×25 км (см. *рис. 7б*). Распространение захваченных холодных вод резко меняется 13.08.2024: ширина становится не превышающей 10 км, а протяжённость — более 190 км вдоль изолиний АДТ (см. *рис. 7в*).

Данные SST, таким образом, свидетельствуют о том, что исследуемый вихрь оказывает влияние на тепловое состояние поверхностного слоя океана.

Приведённый набор данных дистанционного зондирования позволяет широко рассмотреть характеристики проявления вихря на морской поверхности, но не позволяет оценить влияние вихря на вертикальную структуру вод, поэтому также были проанализированы данные гидрологических измерений.

Влияние вихря на вертикальную гидрологическую структуру

В период проведения экспедиционных работ на гидрологическом разрезе в Авачинском заливе 6–7 августа 2024 г. отмечались преимущественно ветры южных направлений со средней скоростью $5,5$ м/с. Во время осуществления измерений атмосферное давление уменьшилось с 1015 до 1011 ГПа, волны зыби сменились ветровыми волнами с высотой до $0,6$ м. Отмечалась значительная облачность, 7 августа появилась морось. Видимость в течение измерений была преимущественно 10 км.

Для анализа гидрологической структуры мезомасштабного вихря рассмотрим наиболее показательные измерения — данные по температуре и солёности, полученные на 1-й и 4-й станциях разреза (см. *рис. 1*). Станция 1 находилась на периферии вихря, а станция 4 была расположена ближе остальных к центру, где наблюдается максимальное заглубление изолиний на разрезе (см. *рис. 9*). На обеих станциях верхний квазиоднородный слой составил 6 и 7 м соответственно. Его температура на 4-й станции была значительно выше, разница со станцией 1 составила более 4°C . Термоклин и галоклин на станции 1 были ярче выражены (градиенты $0,9^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и $0,14\text{‰}/\text{м}$ соответственно), чем на станции 4 (градиенты термоклина $0,6^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и галоклина $0,09\text{‰}/\text{м}$). Однако толщина слоёв термоклина и галоклина на 1-й станции (около 5 м для обоих слоёв) меньше для тех же слоёв на станции 4 (17 м для термоклина и 11 м для галоклина). Ниже границы термоклина на обеих станциях отмечался ХПС, температура как на верхней, так и на нижней границе которого составила $3,4^{\circ}\text{C}$. Глубже — тёплый промежуточный слой, характеристики которого в данной работе не рассматриваются ввиду того, что его нижняя граница находится на больших глубинах, чем проведены измерения. На станции 1 нижняя граница ХПС находится на глубине 240 м, а на станции 4 — 382 м. Таким образом, измерения гидрологической структуры показало, что при наличии мезомасштабного вихря по вертикали отмечается заглубление ХПС: верхней границы на 13 м, а нижней — на 142 м (*рис. 8*, см. с. 269).

Основываясь на данных гидрологического разреза и данных дистанционного зондирования, была проведена оценка глубины вихря, 495 м, и его объёма, 2263 км^3 . Также построены на основе предположения о радиально-симметричной структуре вихря пространственные модели полей солёности и температуры вод на основе данных гидрологических измерений с помощью аппроксимации полиномиальной функцией. Аппроксимация проведена в границах вихря, определённых по РЛИ, для этого использованы данные с ближайших к вихрю станций — с 1-й по 7-ю. Полученные трёхмерные структуры вихря в полях солёности и температуры представлены на *рис. 9* (см. с. 269) (изменения по краям 3D-изображения — следствие проявлений краевого эффекта аппроксимации). Поле солёности (см. *рис. 9а*) хорошо иллюстрирует заглубление менее солёных вод вихрем на глубины, которым характерны более высокие значения солёности. В полученном поле температуры (см. *рис. 9б*) хорошо видно,

как вихрь опускает более холодные воды ХПС в область более тёплых вод тёплого промежуточного слоя. Изотермы и изогалины имеют характерную для вихревой структуры параболическую форму.

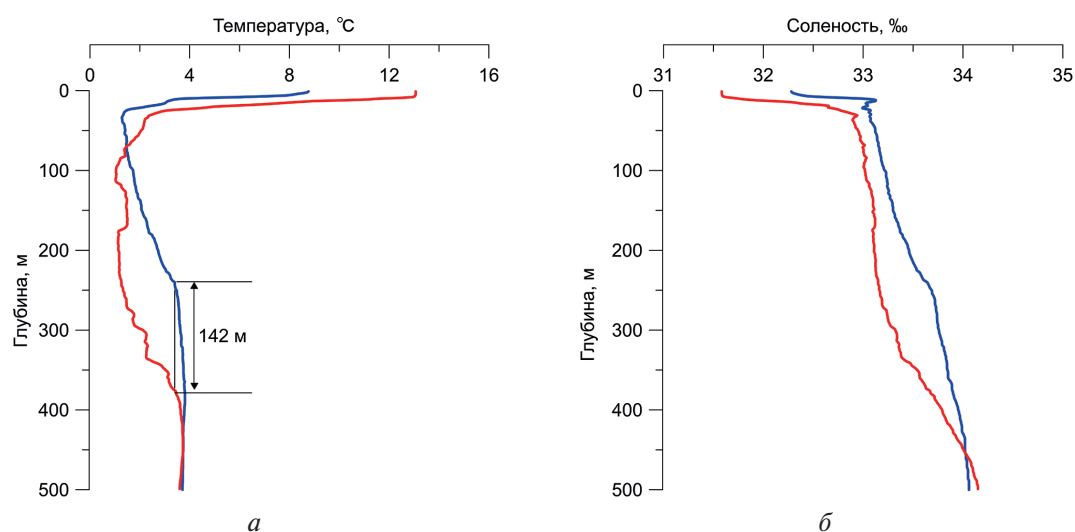


Рис. 8. Профиль температуры (а) и солёности (б) на станциях 1 (синяя линия) и 4 (красная линия)

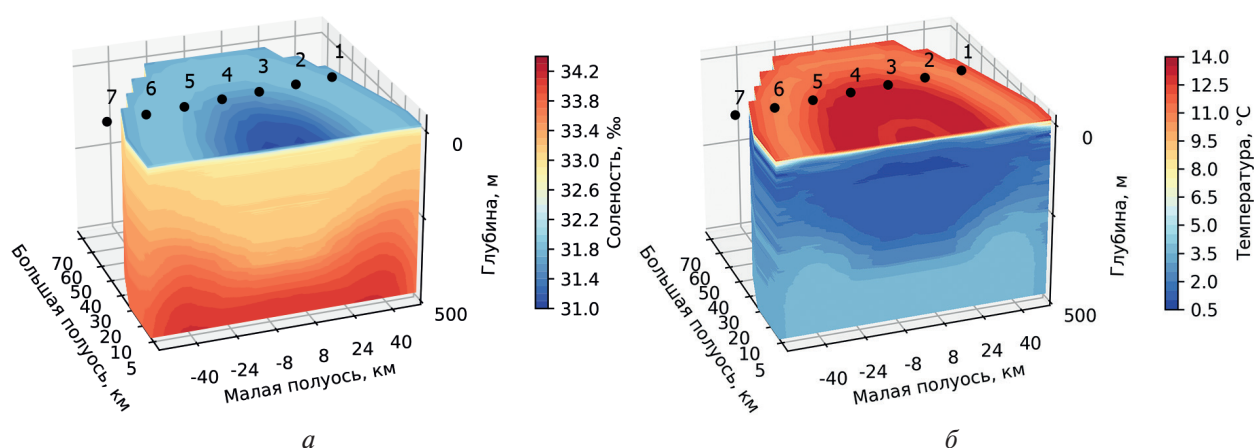


Рис. 9. Трёхмерная структура вихря в полях солёности (а); температуры (б)

Заключение

Настоящее исследование представляет собой комплексный анализ антициклонического мезомасштабного вихря с холодным ядром в Авачинском заливе, выполненный на основе данных дистанционного зондирования и *in situ* измерений. Привлечение разного типа данных проводилось для периода с 05.07, когда вихрь был впервые зарегистрирован в районе по данным альтиметрии, до 13.07, включая даты *in situ* измерений (6–8 августа). Эффективный радиус вихря варьировался от 47 км в момент первой регистрации до 78–81 км ближе к концу анализируемого периода. Температура в центре вихря на поверхности росла от 8 до 12 °С, при этом всегда оставаясь на 1–2° меньше, чем у окружающих вод.

Пространственный анализ спутниковых наблюдений выявил ярко-выраженные спиральные структуры в полях хлорофилла *a*, взвешенных веществ и коэффициента диффузного ослабления света, что указывает на важный вклад структуры в перераспределение биогенных веществ в прибрежной зоне. Это согласуется с предыдущими наблюдениями о связи мезомасштабной динамики с формированием условий, благоприятных для фитопланктона,

и подчёркивает роль вихрей как движущей силы в экосистемной динамике прибрежных вод Авачинского залива. Холодное ядро вихря, устойчиво наблюдаемое в поле температуры поверхности моря по данным дистанционного зондирования, подтверждает существование обратных тепловых аномалий в антициклонах, ранее считавшихся редкими.

Анализ *in situ* измерений позволил определить, что вихревая структура характеризуется значительным заглублением холодного промежуточного слоя (более чем 140 м), выраженной термохалинной структурой (чётко прослеживаются верхний квазиоднородный слой, термоклин/галоклин, ХПС) и средним объёмом порядка 2263 км³.

Описанная трёхмерная структура и эволюция вихря демонстрируют уникальные особенности циркуляции в районе Авачинского залива — активной зоне генерации мезомасштабных вихрей с нетипичной термической стратификацией. Результаты работы расширяют понимание процессов формирования антициклонов с холодным ядром и подчёркивают необходимость совместного использования спутниковых и контактных данных при исследовании трёхмерной структуры и влияния вихрей на динамические процессы в прибрежной зоне.

Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг», включая уникальную научную установку «Вега-Science», при поддержке Минобрнауки в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8). Финансирование работ, выполненных О. А. Атаджановой и А. А. Коником, получено в рамках государственного задания Минобрнауки России для Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (№ FMWE-2024-0028). Сбор данных выполнен в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2024-117).

Литература

1. Ванин Н. С. Термическая структура вод в северо-западной части Тихого океана и роль ветра и адвекции в ее формировании // Изв. ТИНРО. 2017. Т. 190. С. 146–158. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-190-146-158.
2. Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А. и др. Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам // Эколог. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 16–35.
3. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
5. Пранц С. В. Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 387–400. DOI: 10.1134/S0001433821040216.
6. Рогачев К. А., Шлык Н. В. Роль мезомасштабных вихрей в динамике Камчатского и Алеянского течений // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 145. С. 228–234.
7. Романов А. А., Шевченко Г. В., Цой А. Т. Идентификация мезомасштабных вихревых структур на юго-восточном шельфе Камчатки по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 80–89.
8. Тепнин О. Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исслед. водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93.
9. Шлык Н. В., Рогачев К. А. Быстрое опреснение Камчатского течения // Вестн. Дальневосточного отделения Российской акад. наук. 2016. № 5(189). С. 113–119.
10. Amores A., Jordà G., Arsouze T., Le Sommer J. Up to what extent can we characterize ocean eddies using present-day gridded altimetric products? // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. No. 10. P. 7220–7236. DOI: 10.1029/2018JC014140.

11. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. V. 91. No. 2. P. 167–216. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
12. Du Y., Song W., He Q. et al. Deep learning with multi-scale feature fusion in remote sensing for automatic oceanic eddy detection // *Information Fusion*. 2019. V. 49. P. 89–99. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.09.006.
13. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L. Slicks as indicators for marine processes // *Oceanography*. 2013. V. 26. No. 2. P. 138–149.
14. Itoh S., Yasuda I. Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio–Oyashio Extension region detected from the distribution of the sea surface height anomaly // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. No. 5. P. 1018–1034. DOI: 10.1175/2009JPO4265.1.
15. Johannessen J. A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O. M., Samuel P., Browne D., Vachon P. SAR ocean feature catalogue. Noordwijk, Netherlands: ESA Publication Division, ESTEC, 1994. 106 p.
16. L'Her A., Reinert M., Prants S. et al. Eddy formation in the bays of Kamchatka and fluxes to the open ocean // *Ocean Dynamics*. 2021. V. 71. No. 5. P. 601–612. DOI: 10.1007/s10236-021-01449-w.
17. Marcello J., Eugenio F., Estrada-Allis S., Sangrà P. Segmentation and tracking of anticyclonic eddies during a submarine volcanic eruption using ocean colour imagery // *Sensors*. 2015. V. 15. No. 4. P. 8732–8748. DOI: 10.3390/s150408732.
18. Moschos E., Barboni A., Stegner A. Why do inverse eddy surface temperature anomalies emerge? The case of the Mediterranean Sea // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 15. Article 3807. DOI: 10.3390/rs14153807.
19. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C. et al. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Pt. 3 // NASA Technical Memorandum. NASA Goddard Space Flight Center, 2000. V. 11. P. 9–23.
20. Pegliasco C., Busché C., Faugère Y. Mesoscale eddy trajectory atlas META3.2 delayed-time all satellites: version META3.2 DT allsat. 2022. <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2022.005.210802>.
21. Prants S. V., Lobanov V. B., Budyansky M. V., Uleysky M. Y. Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies // *Deep Sea Research. Pt. I: Oceanographic Research Papers*. 2016. V. 109. P. 61–75. DOI: 10.1016/j.dsr.2016.01.003.
22. Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Y. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // *Ocean Science*. 2017. V. 13. No. 3. P. 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
23. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Carmack E. C. The shedding of mesoscale anticyclonic eddies from the Alaskan Stream and westward transport of warm water // *Deep Sea Research. Pt. II: Topical Studies in Oceanography*. 2007. V. 54. No. 23–26. P. 2643–2656. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.08.017.
24. Stegner A., Le Vu B., Dumas F. et al. Cyclone-anticyclone asymmetry of eddy detection on gridded altimetry product in the Mediterranean Sea // *J. Geophysical Research: Ocean*. 2021. V. 126. No. 9. Article e2021JC017475. DOI: 10.1029/2021JC017475.
25. Sun W., Dong C., Tan W., He Y. Statistical characteristics of cyclonic warm-core eddies and anticyclonic cold-core eddies in the North Pacific based on remote sensing data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 2. Article 208. DOI: 10.3390/rs11020208.
26. Ueno H., Yasuda I. Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2000. V. 105. No. C7. P. 16885–16897. DOI: 10.1029/2000JC900020.
27. Ueno H., Bracco A., Barth J. A. et al. Review of oceanic mesoscale processes in the North Pacific: Physical and biogeochemical impacts // *Progress in Oceanography*. 2023. V. 212. Article 102955. DOI: 10.1016/j.pocean.2022.102955.
28. Yu L. S., Bosse A., Fer I. et al. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // *J. Geophysical Research*. 2017. V. 122. No. 8. P. 6814–6834. DOI: 10.1002/2017JC012982.
29. Zhou J., Zhou G., Liu H. et al. Mesoscale eddy-induced ocean dynamic and thermodynamic anomalies in the North Pacific // *Frontiers in Marine Science*. 2021. V. 8. Article 756918. DOI: 10.3389/fmars.2021.756918.

Analysis of a mesoscale eddy structure based on multispectral satellite and hydrological measurements in Avacha Bay in the summer of 2024

M. V. Vrublevsky¹, A. A. Konik², O. A. Atadzhanova²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

During the study, spatial and temporal characteristics of an anticyclonic mesoscale eddy in Avacha Bay were obtained using a wide range of satellite sensors and concurrent hydrological measurements *in situ*. Using data from space-based sensors, the development of eddy characteristics (spatial dimensions and position, influence on the field of sea surface temperature and concentration of suspended matter and chlorophyll) was analyzed from the moment of its appearance in Avacha Bay (05.07.2024) until the end of the time period (13.08.2024), which can be considered quasi-simultaneous to the *in situ* measurements. At the time of measurements, the effective radius of the eddy reached 78 km, the area was 9600 km², and the sea surface temperature in the eddy differed from the external waters by 1–2 °C. From analysis of the hydrological survey data, an assessment was made of the influence of the studied eddy on the hydrological structure of Avacha Bay waters. The eddy deepens by 142 m the cold intermediate layer, the temperature of which at upper and lower boundaries was 3.4 °C. A comprehensive analysis of remote sensing and *in situ* data made it possible to estimate the eddy depth (495 m) and volume (2263 km³), and the reconstruction of salinity and temperature fields made it possible to assess the change in the structure of Avacha Bay waters under the influence of the eddy: the obtained isotherms and isohalines have a characteristic parabolic shape. The studied anticyclonic eddy has a cold core in the sea surface temperature field, which is a relatively rare phenomenon in the World Ocean, and that is why its comprehensive analysis makes a significant contribution to the study of similar phenomena.

Keywords: mesoscale eddy, satellite altimetry, SWOT, Sentinel-3, OLCI, MODIS, *in situ*, hydrological measurements, Avacha Bay, Pacific Ocean

Accepted: 29.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-260-273

References

1. Vanin N. S., Thermal structure of waters in the northwestern Pacific Ocean and the role of wind and advection in its formation, *Izvestia TINRO*, 2017, V. 190, pp. 146–158 (in Russian), DOI: 10.26428/1606-9919-2017-190-146-158.
2. Zimin A. V., Romanenkov D. A., Konik A. A. et al., Multi-scale eddy dynamics in the Pacific Ocean waters adjacent to the Kamchatka Peninsula and the northern Kuril Islands, *Ehkologicheskaya bezopasnost' pri-brezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2024, No. 3. pp. 16–35 (in Russian).
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
5. Prants S. V., Trench eddies in the Northwest Pacific: An overview, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, V. 57, pp. 341–353, DOI: 10.1134/S0001433821040216.
6. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Role of mesoscale eddies in dynamics of the Kamchatka current and Alaskan stream, *Izvestia TINRO*, 2006, V. 145, pp. 228–234 (in Russian).
7. Romanov A. A., Shevchenko G. V., Tsoi A. T., Identification of mesoscale eddy structures on the south-eastern shelf of Kamchatka by the satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 80–89 (in Russian).

8. Tepnin O. B., Variability of hydrological conditions at spawning sites of East Kamchatka walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in 2012–2022, *The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean*, 2022, V. 66, pp. 79–93 (in Russian).
9. Shlyk N. V., Rogachev K. A., Rapid freshening of the Kamchatka current, *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 2016, No. 5, pp. 113–119 (in Russian).
10. Amores A., Jordà G., Arsouze T., Le Sommer J., Up to what extent can we characterize ocean eddies using present-day gridded altimetric products?, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, V. 123, No. 10, pp. 7220–7236, DOI: 10.1029/2018JC014140.
11. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, V. 91, No. 2, pp. 167–216, DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
12. Du Y., Song W., He Q. et al., Deep learning with multi-scale feature fusion in remote sensing for automatic oceanic eddy detection, *Information Fusion*, 2019, V. 49, pp. 89–99, DOI: 10.1016/j.inffus.2018.09.006.
13. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L., Slicks as indicators for marine processes, *Oceanography*, 2013, V. 26, No. 2, pp. 138–149.
14. Itoh S., Yasuda I., Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio–Oyashio Extension region detected from the distribution of the sea surface height anomaly, *J. Physical Oceanography*, 2010, V. 40, No. 5, pp. 1018–1034, DOI: 10.1175/2009JPO4265.1.
15. Johannessen J. A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O. M., Samuel P., Browne D., Vachon P., *SAR ocean feature catalogue*, Noordwijk, Netherlands: ESA Publication Division, ESTEC, 1994, 106 p.
16. L'Her A., Reinert M., Prants S. et al., Eddy formation in the bays of Kamchatka and fluxes to the open ocean, *Ocean Dynamics*, 2021, V. 71, No. 5, pp. 601–612, DOI: 10.1007/s10236-021-01449-w.
17. Marcello J., Eugenio F., Estrada-Allis S., Sangrà P., Segmentation and tracking of anticyclonic eddies during a submarine volcanic eruption using ocean colour imagery, *Sensors*, 2015, V. 15, No. 4, pp. 8732–8748, DOI: 10.3390/s150408732.
18. Moschos E., Barboni A., Stegner A., Why do inverse eddy surface temperature anomalies emerge? The case of the Mediterranean Sea, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3807, DOI: 10.3390/rs14153807.
19. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C. et al., SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Pt. 3, In: *NASA Technical Memorandum*, NASA Goddard Space Flight Center, 2000, V. 11, pp. 9–23.
20. Pegliasco C., Busché C., Faugère Y., *Mesoscale eddy trajectory atlas META3.2 delayed-time all satellites: version META3.2 DT allsat*, 2022, <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2022.005.210802>.
21. Prants S. V., Lobanov V. B., Budyansky M. V., Uleysky M. Y., Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies, *Deep Sea Research. Pt. I: Oceanographic Research Papers*, 2016, V. 109, pp. 61–75, DOI: 10.1016/j.dsr.2016.01.003.
22. Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Y., Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides, *Ocean Science*, 2017, V. 13, No. 3, pp. 453–463, DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
23. Rogachev K. A., Shlyk N. V., Carmack E. C., The shedding of mesoscale anticyclonic eddies from the Alaskan Stream and westward transport of warm water, *Deep Sea Research. Pt. II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, V. 54, No. 23–26, pp. 2643–2656, DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.08.017.
24. Stegner A., Le Vu B., Dumas F. et al., Cyclone-anticyclone asymmetry of eddy detection on gridded altimetry product in the Mediterranean Sea, *J. Geophysical Research: Ocean*, 2021, V. 126, No. 9, Article e2021JC017475, DOI: 10.1029/2021JC017475.
25. Sun W., Dong C., Tan W., He Y., Statistical characteristics of cyclonic warm-core eddies and anticyclonic cold-core eddies in the North Pacific based on remote sensing data, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 2, Article 208, DOI: 10.3390/rs11020208.
26. Ueno H., Yasuda I., Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2000, V. 105, No. C7, pp. 16885–16897, DOI: 10.1029/2000JC900020.
27. Ueno H., Bracco A., Barth J. A. et al., Review of oceanic mesoscale processes in the North Pacific: Physical and biogeochemical impacts, *Progress in Oceanography*, 2023, V. 212, Article 102955, DOI: 10.1016/j.pocean.2022.102955.
28. Yu L. S., Bosse A., Fer I. et al., The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders, *J. Geophysical Research*, 2017, V. 122, No. 8, pp. 6814–6834, DOI: 10.1002/2017JC012982.
29. Zhou J., Zhou G., Liu H. et al., Mesoscale eddy-induced ocean dynamic and thermodynamic anomalies in the North Pacific, *Frontiers in Marine Science*, 2021, V. 8, Article 756918, DOI: 10.3389/fmars.2021.756918.