

ВЛИЯНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ В АВАЧИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ЛЕТНИЕ СЕЗОНЫ 2024–2025 гг.

А. В. Зимин¹, О. А. Атаджанова¹, А. А. Коник^{1,2}, П. А. Швец^{1,3}, И. А. Герасимов²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9;

³ Российский государственный гидрометеорологический университет,
Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, д. 79
e-mail: zimin2@mail.ru

Особый интерес в Авачинском заливе, в значимом рыбопромысловом районе северо-западной части Тихого океана, представляют не часто встречающиеся в других районах океана антициклонические вихри с холодным ядром. В связи с этим целью работы является оценка характера их влияния на вертикальное распределение холодного промежуточного слоя (ХПС) в заливе в летний период. Используются данные спутниковой альтиметрии и судовых STD-измерений, выполненных в ходе двух экспедиций 2024 г. и 2025 г. Установлено, что в оба года в акватории присутствовали антициклонические вихри, формировавшиеся у мыса Шипунского и смещавшиеся к югу залива, однако их положение в период экспедиций различалось: в 2024 г. вихрь был смещен в глубоководную область, а в 2025 г. локализовался над континентальным склоном. В 2024 г. зафиксировано максимальное расширение ХПС в зоне, удаленной от шельфа (подъем верхней границы на 30 м и заглубление нижней на 50 м относительно климатических значений). В 2025 г. наибольшие аномалии наблюдались над континентальным склоном (заглубление нижней границы более чем на 60 м) с прижатием холодных вод к шельфу; отмечена также трансформация ХПС в прибрежной зоне, обусловленная, вероятнее всего, адвекцией вод из вихря. Установлено, что пространственная локализация антициклонических вихрей – важный фактор межгодовой изменчивости вертикальной структуры ХПС, при этом наиболее значительные изменения претерпевает глубина залегания его нижней границы.

Ключевые слова: холодный промежуточный слой, антициклонические вихри, спутниковая альтиметрия, STD-измерения, межгодовая изменчивость, Авачинский залив

Введение

Акватория Авачинского залива является одной из зон активного российского рыболовства в северо-западной части Тихого океана (Антонов и др., 2024). Этому способствует не только высокая биопродуктивность акватории, но и наличие на ее берегах крупного незамерзающего порта Петропавловск-Камчатский, расположенного в

Авачинской бухте. Это определяет устойчивый интерес к изучению абиотических факторов водной среды (Тепнин, 2022; Романенков и др., 2025; Zimin et al., 2025), прежде всего термических и динамических процессов, которые во многом обуславливают распределение промысловых скоплений. Несмотря на это, гидрологические условия и мезомасштабная вихревая динамика залива остаются слабо изученными в силу обширности акватории, эпизодического характера гидрологических наблюдений и сложности однозначной верификации спутниковых данных в прибрежной зоне.

Авачинский залив, расположенный у восточного побережья Камчатского полуострова, представляет собой одну из крупных обособленных прибрежных акваторий северо-западной части Тихого океана (рисунок 1). С северо-востока залив ограничен мысом Шипунским, с юга-запада – мысом к югу от входа в бухту Лиственничная, а его восточная часть свободно сообщается с глубоководными районами океана (Орлова и др., 2024). В рельефе дна залива выделяются шельф и континентальный склон. Ширина шельфа максимальна на севере залива и сужается к центру и югу. Континентальный склон крутой, в центральной и южной частях изрезан подводными каньонами; глубины открытой части залива превышают 1000 м.

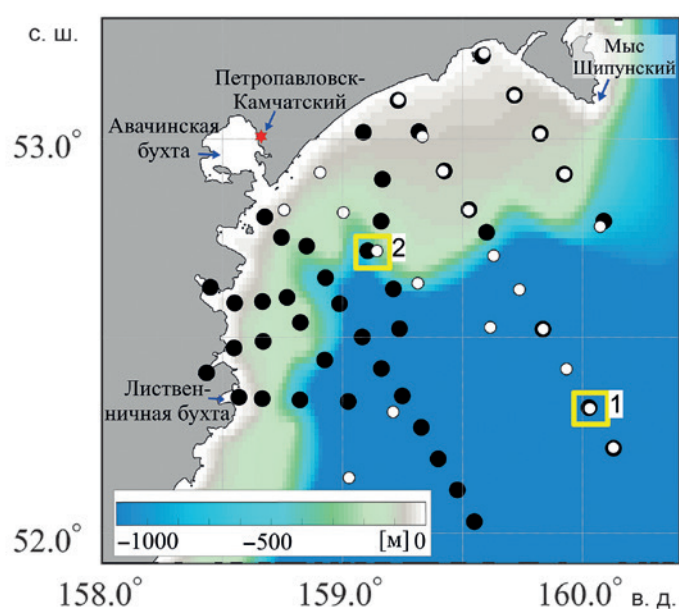


Рис. 1 – Батиметрическая карта Авачинского залива с указанием положения гидрологических станций *in situ* в 2024 г. (белые круги) и 2025 г. (черные круги). Желтыми квадратами 1 и 2 обведены станции, данные с которых используются для сравнения профилей температуры

В мезомасштабной циркуляции вод Авачинского залива важную роль играет Восточно-Камчатское течение, являющееся составляющей субарктического круговорота северной части Тихого океана. Оно представляет собой узкую струю шириной 25–80 км, стержень которой расположен на расстоянии около 100 км от берега (Вакульская и др., 2019; L'Her et al., 2021). В среднегодовом ходе максимум скоростей

течения приходится на зимний период, а минимум – на летний (Трусенкова, Кустова, 2026). В теплый сезон на акватории, прилегающей к мысу Шипунскому, нередко формируются антициклонические ринги, что подтверждается данными спутниковой альтиметрии (Шевченко, Романов, 2006; Буслов и др., 2006). Формирование этих структур обусловлено совместным действием двух механизмов. Ослабление течения снижает стабилизирующее влияние горизонтального переноса и способствует развитию бароклинной неустойчивости, при которой доступная потенциальная энергия потока трансформируется в кинетическую энергию вихревых движений. Параллельно топографические неоднородности района (изрезанная береговая линия и неровности рельефа дна) инициируют сдвиговую неустойчивость (L'Her et al., 2021). Воды Восточно-Камчатского течения, проникая в Авачинский залив, определяют его термохалинный режим и способствуют генерации мезомасштабных вихрей (Рогачев, Шлык, 2006; Зимин и др., 2024). Дополнительным фактором формирования гидрологических полей выступает пресноводный сток, под влиянием которого в прибрежных районах в поверхностных слоях формируются локальные зоны опреснения (Лобанов и др., 2023; Зимин и др., 2025).

Вертикальная гидрологическая структура вод Авачинского залива соответствует субарктическому типу стратификации (Тепнин, 2022) и в теплый период года включает три слоя: поверхностный прогретый, холодный промежуточный (ХПС) и теплый промежуточный (ТПС). Поверхностный слой формируется под действием солнечной радиации, речного стока и динамического воздействия атмосферы. Температура на поверхности достигает 10–15 °С, понижаясь до 3–6 °С к глубине 20 м. ХПС имеет, как считается, преимущественно берингоморское происхождение, где образуется в результате зимней конвекции с последующим заглублением холодных поверхностных вод (Ueno, Yasuda, 2000). ХПС в теплый период года выделяется как область с температурами 1.5–2.5 °С и плавным понижением солёности (Богданов, Мороз, 2004; Ванин, 2017; Шевченко и др., 2025). Отмечается значительная изменчивость границ слоя: верхняя граница варьирует в диапазоне от 20 до 50 м, нижняя – от 150 до 300 м. Теплый промежуточный слой располагается в интервале глубин более 200–300 м и формируется за счет теплых и более соленых промежуточных океанских вод.

В целом происхождение и динамика ХПС остаются предметом дискуссий: для различных акваторий Мирового океана предложены как чисто конвективные, так и адвективные, а также комбинированные («конвективно-адвективные») гипотезы (Куклев и др., 2019). В Балтийском море, например, дополнительным механизмом рассматривается ранневесенний каскадинг – сползание плотных прибрежных вод вдоль склона при прогреве от температуры ниже температуры максимальной плотности до нее (Чубаренко, 2010; Степанова, 2013). Стоит отметить, что для Авачинского залива вопрос об особенностях локального распределения и трансформации ХПС остается открытым, особенно в условиях интенсивной адвекции вод.

Пристальный практический интерес к глубине залегания нижней границы ХПС на изучаемой акватории продиктован локализацией наиболее массового «очага» нереста восточнокамчатской популяции минтая и ряда других промысловых видов рыб в

центральной части залива – в пределах вершин глубоководных каньонов (Буслов и др., 2006), глубоко врезающихся в шельф восточнее Авачинской бухты, – где нерест приурочен к границе раздела ХПС – ТПС (Коник и др., 2024).

Вихревые образования, формирующиеся на периферии Восточно-Камчатского течения, характеризуются горизонтальными масштабами 50–100 км и временем жизни от нескольких суток до месяцев (Chelton et al., 2011; Zhou et al., 2021). Благодаря своим размерам и продолжительности существования, эти вихри выступают ключевым механизмом горизонтального и вертикального обмена, способным существенно трансформировать вертикальную структуру вод в регионе. Их пространственные масштабы существенно превышают локальный бароклинный радиус деформации Россби, который в Авачинском заливе достигает 15 км (Зимин и др., 2024), что обосновывает их классификацию как мезомасштабных вихревых образований.

Район Авачинского залива и прилегающая акватория характеризуются высокой частотой генерации антициклонических мезомасштабных вихрей (Пранц и др., 2021; Зимин и др., 2024). В большей части акватории Мирового океана антициклонические вихри, как правило, обладают теплым ядром. Это обусловлено геострофическим балансом, при котором в центральной области вихря происходит опускание изопикн, способствующее захвату теплых поверхностных вод (Itoh et al., 2010). В западной субарктической зоне Тихого океана, напротив, регулярно наблюдаются антициклонические вихри с холодным ядром (Ueno et al., 2000), типичные для районов с выраженным ХПС. В таких условиях динамика вихря обеспечивает захват и удержание вод ХПС в его ядре, формируя устойчивую холодную аномалию. Широкое распространение этого режима в субарктике северной части Тихого океана подтверждено статистическим анализом спутниковых данных (Sun et al., 2019).

В Авачинском заливе и его окрестностях пик частоты таких вихрей наблюдается в июле–августе (Sun et al., 2019), что совпадает с периодом сезонного ослабления Восточно-Камчатского течения (Никитин, Жуковский, 2023). Примером подобной структуры может служить антициклонический вихрь, зарегистрированный в заливе в августе 2024 г. (Врублевский и др., 2025). Он вызывал заглубление границы холодного промежуточного слоя (ХПС) примерно на 150 м относительно фонового положения. Его средний эффективный радиус достигал 78 км, а площадь поверхностного проявления – около 9600 км². Это демонстрирует возможность формирования значительных аномалий в положении ХПС под влиянием вихря. Однако остается неясным, обладают ли вихри, регистрируемые в летний период в разные годы, сходным характером влияния на расположение ХПС в Авачинском заливе.

Цель настоящей работы – оценить характер влияния антициклонических вихрей с холодным ядром на вертикальное распределение холодного промежуточного слоя (ХПС) в летний период в Авачинском заливе в разные годы.

Материалы и методы

Для исследования особенностей мезомасштабной вихревой динамики Авачинского залива в июле–августе 2024 и 2025 гг. использовались данные из атласа META 3.2 (Mesoscale Eddy Trajectory Atlas), распространяемого французским центром AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data; <https://www.aviso.altimetry.fr>). Атлас содержит количественные параметры вихревых структур: координаты центра, эффективный радиус, эффективную площадь, а также геострофические скорости (Pegliasco et al., 2022). Дополнительно привлекались ежедневные поля абсолютной динамической топографии (АДТ) на сетке $0.25 \times 0.25^\circ$, полученные из продукта SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_008_046 портала Copernicus Marine Environment Monitoring Service (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_008_046). На картах АДТ вихревые горизонтальные проявления регистрировались как последовательно замкнутые друг за другом изолинии. Крайняя замкнутая изолиния принималась за внешнюю границу вихря.

Гидрологическая структура вод в заливе анализировалась по данным измерений температуры и солёности, полученным в ходе двух экспедиций по программе «Тихоокеанский плавучий университет» на НИС «Профессор Мультановский». В 2024 г. с 5 по 8 августа проведены 24 гидрологических станции, а в 2025 г. с 28 июля по 3 августа – 42 станции; расположение станций показано на рисунке 1. Зондирование выполнялось с помощью гидрологического зонда CTD-48 (Sea Sun Technology, Германия) до глубины 400–500 м (или до максимально возможной в шельфовых районах). Данные температуры и солёности осреднены с вертикальным шагом 1 м. На основе этих данных были построены разрезы гидрологических характеристик, вертикальные профили, карты геострофических течений, а также получены оценки параметров холодного промежуточного слоя (ХПС).

Карты геострофических течений по данным съёмок рассчитывались для динамической поверхности 50 дцб относительно 400 дцб с помощью программы OBZerver (Бережинский и др., 2002). В качестве маркера ХПС вслед за (Шевченко и др., 2025) был принят слой водной толщи с температурой менее 2°C . Верхняя граница ХПС определялась как глубина, на которой температура опускается ниже 2°C . Нижняя граница ХПС фиксировалась на глубине, где температура вновь превышает порог 2°C . Ядро ХПС идентифицировалось по экстремуму – минимальному значению температуры в пределах выделенного слоя. Дополнительно привлекались данные WOA 2023 (World Ocean Atlas) (<https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/bin/woa23.pl>) с шагом 0.25° градуса для оценки фоновых климатических условий. Использовались вертикальные профили за июль и август в точках, ближайших к центру каждого из двух квадратов (рисунок 1), затем они осреднялись и сравнивались с профилями температуры на станциях за 2024 и 2025 гг., попадающих в квадраты.

Результаты

Согласно данным атласа МЕТА 3.2, в период экспедиционных исследований 2024 г. в районе Авачинского залива с 5 июля по 13 августа был зарегистрирован антициклонический мезомасштабный вихрь № 182537. За время его существования эффективный радиус варьировался от 23 до 78 км, площадь – от 800 до 14 500 км², а максимальная геострофическая скорость достигала 23.5 см/с. В 2025 г. в заливе зафиксирована антициклоническая структура № 222138, наблюдавшаяся с 26 июля по 11 августа. Ее эффективный радиус изменялся от 30 до 53 км, площадь – от 800 до 9200 км², максимальная геострофическая скорость составила 19.8 см/с. Обе вихревые структуры формировались в районе мыса Шипунского и в дальнейшем смещались в южном направлении вдоль полуострова Камчатка.

Особенности динамики вихревых структур можно проследить по рисунку 2, на котором представлены карты абсолютной динамической топографии (АДТ) для дней проведения работ на гидрологических разрезах, пересекающих вихри (6 августа 2024 г. и 30 июля 2025 г.), а также за неделю до (30 июля 2024 г. и 23 июля 2025 г.) и неделю после (13 августа 2024 г. и 6 августа 2025 г.) соответственно.

За неделю до начала работ на гидрологическом разрезе в 2024 г. вихрь № 182537 был вытянут вдоль восточной части Авачинского залива и располагался преимущественно в глубоководной области, при этом максимальные значения АДТ (0.42 м) отмечались на юге. В день контактных измерений наблюдалась интенсификация проявлений вихря в поле АДТ: максимум вырос до 0.46 м, а его центр сместился к югу относительно предыдущего положения. Выполненный разрез затронул лишь западную периферию, поскольку ядро находилось восточнее линии зондирования. Спустя неделю вихрь сместился на юго-восток, и большая часть его была уже вне залива. В это же время в районе мыса Шипунского стала развиваться новая антициклоническая аномалия.

В 2025 г. ситуация отличалась. За неделю до измерений на разрезе вихрь № 222138 локализовался у мыса Шипунского, воздействуя на прибрежную шельфовую зону. По форме он был более компактным и симметричным, чем вихрь, отмеченный годом ранее, а пик АДТ не превышал 0.4 м. К моменту выполнения гидрологических работ на указанном на рисунке разрезе (30.07.2025) вихрь переместился в центральную часть залива, гидрологический разрез прошел ближе к центру. В эти дни максимум АДТ достиг 0.43 м. Еще через неделю вихрь продолжил движение к югу, интенсивность его проявлений в поле АДТ упала до 0.39 м, а форма вытянулась вдоль континентального склона.

Как можно увидеть, между данными атласа МЕТА 3.2 и представленными полями АДТ наблюдается расхождение в датах начала проявления вихревой структуры. Данное различие обусловлено особенностями алгоритма идентификации: вихрь в атласе регистрируется только при выполнении ряда пороговых критериев (замкнутость изолиний АДТ, достижение характерного эффективного радиуса, а также устойчивость структуры во времени). Отметим, что вихревая структура на ранней стадии формирования уже

может проявляться в полях АДТ, однако еще не удовлетворяет указанным критериям и, соответственно, не классифицируется алгоритмом как самостоятельный вихрь, подлежащий включению в атлас.

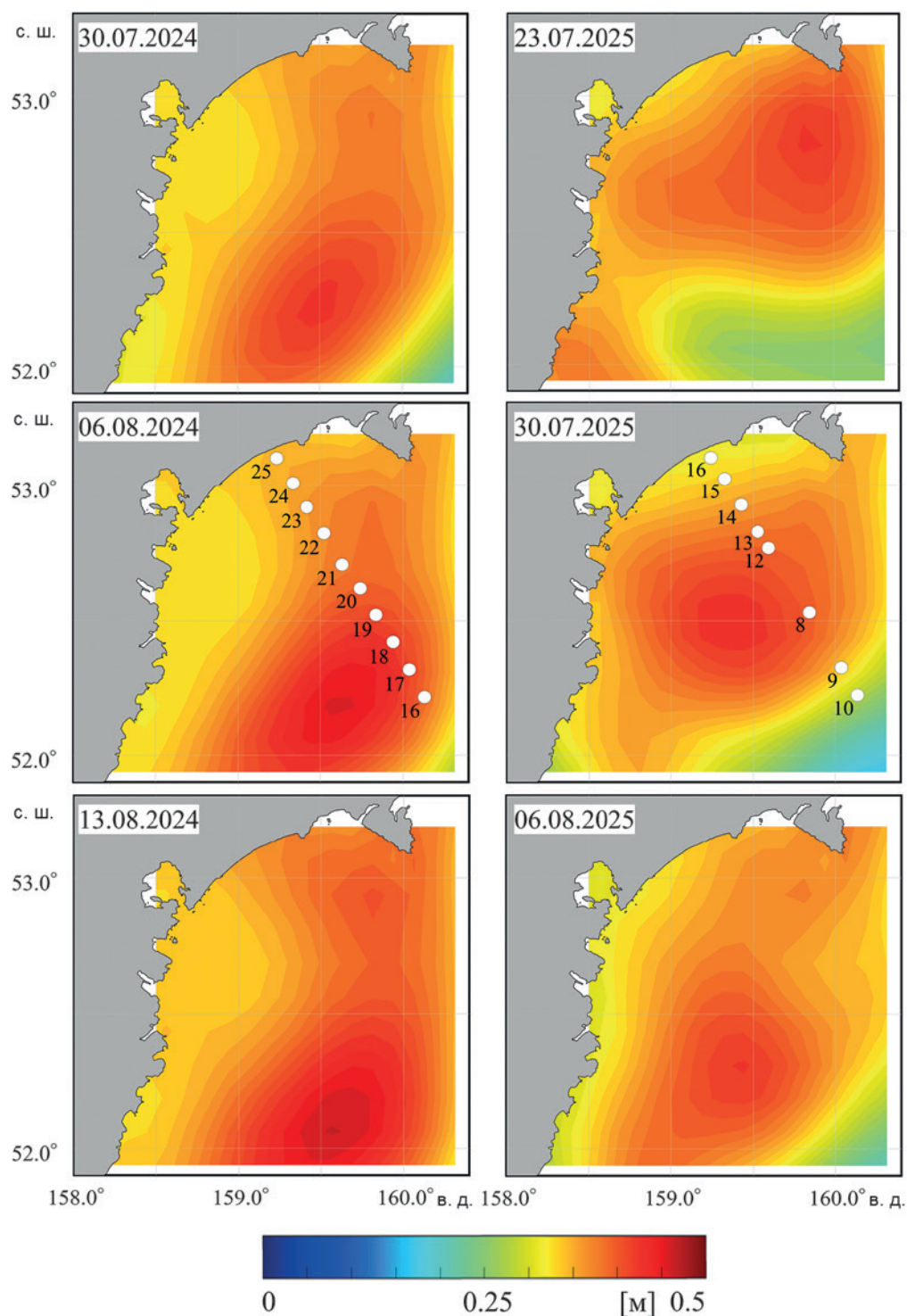


Рис. 2 – Карты АДТ для акватории Авачинского залива за дни проведения гидрологических разрезов, пересекающих вихри (6 августа 2024 г. и 30 июля 2025 г.), а также за неделю до (30 июля 2024 г. и 23 июля 2025 г.) и неделю после (13 августа 2024 г. и 6 августа 2025 г.). Точками указаны станции разрезов, представленных на рисунке 4

На рисунке 3а представлена карта геострофических течений, рассчитанная по контактному данным съемки 2024 г. В районе Авачинского залива за пределами шельфа в глубоководной части выделяется отчетливая антициклоническая вихревая структура с ядром в районе с координатами 52.4° с. ш., 159.8° в. д. На периферии структуры зарегистрирована геострофическая скорость, достигшая 21 см/с. Эффективный радиус вихря, оцененный по зоне скоростей более 10 см/с, составляет 30–35 км, а площадь, охваченная интенсивным вращением, – около 3000–3500 км². За пределами вихревой структуры фоновые течения характеризуются низкими скоростями (около 2 см/с) и неупорядоченными направлениями. В центральной части залива ближе к шельфу прослеживается слабовыраженная циклоническая циркуляция. В юго-западной части акватории, где выражен поток вод преимущественно в южном направлении, вероятно, прослеживается влияние Восточно-Камчатского течения.

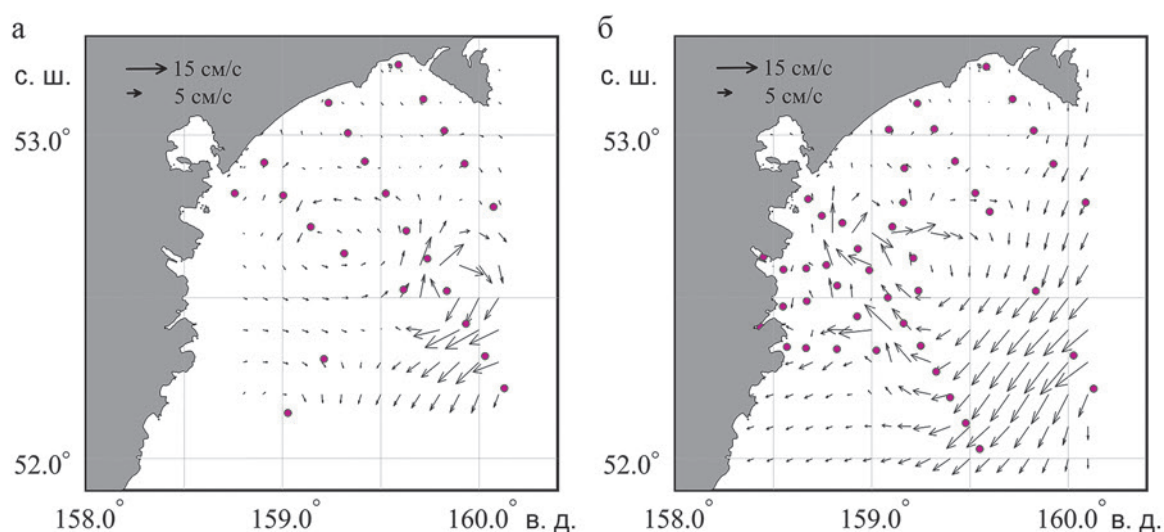


Рис. 3 – Схемы геострофических течений на глубине 50 дцб в районе Авачинского залива по данным экспедиционных работ: а – в 2024 г.; б – в 2025 г.

На рисунке 3б представлена карта геострофических течений, рассчитанная по данным съемки 2025 г. В центральной части Авачинского залива над континентальным склоном выделяется антициклоническая вихревая структура. Ядро вихря расположено в районе с приблизительными координатами 52.5° с. ш., 159.1° в. д. На периферии структуры зарегистрирована максимальная геострофическая скорость, достигшая 25 см/с. Эффективный радиус вихря, оцененный по зоне скоростей более 10 см/с, составляет около 25–30 км, а площадь, охваченная интенсивным вращением, – примерно 2000–2800 км². Помимо основной вихревой структуры, в восточной части акватории наблюдаются квазиоднородные течения со слабой пространственной изменчивостью преимущественно юго-западного направления, что отражает влияние Восточно-Камчатского течения.

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить как общие черты, так и существенные различия в динамике и пространственной структуре антициклонических вихрей, зарегистрированных в Авачинском заливе в 2024 и 2025 годах. Оба вихря

формировались в районе мыса Шипунского и смещались в южных направлениях, что указывает на единый механизм их генерации. Однако, по своим морфометрическим и динамическим характеристикам вихри различаются. Вихрь 2024 г. имел более вытянутую форму, большие размеры (эффективный радиус до 78 км по данным альтиметрии и 30–35 км по геострофическим расчетам) и занимал преимущественно глубоководную часть залива. Вихрь 2025 г., напротив, отличался более компактной и симметричной формой, меньшими пространственными масштабами (радиус до 53 км по альтиметрическим и 25–30 км по геострофическим данным) и располагался ближе к континентальному склону в центральной части залива. Кроме того, в 2024 г. на периферии вихря в центральной части залива наблюдалась слабовыраженная циклоническая циркуляция, тогда как в 2025 г. в восточной и юго-восточной части акватории проявлялось влияние Восточно-Камчатского течения. Таким образом, несмотря на общую природу формирования и схожие траектории движения, вихри 2024 г. и 2025 г. демонстрируют заметные различия в пространственной структуре.

На гидрологическом разрезе, выполненном в период экспедиционных работ 2024 г. (рисунки 4а, б), вертикальная структура вод Авачинского залива демонстрирует трехслойное распределение, характерное для субарктической стратификации. Поверхностный слой характеризуется температурой 12.7–13.4 °C и пониженной соленостью (31.1–31.6 ‰). Максимальные значения температуры и минимальные значения солености наблюдаются в прибрежной зоне шельфа, что обусловлено береговым пресным стоком и радиационным прогревом. Ниже, на глубинах более 200–250 м, располагается теплый промежуточный слой с температурой 3.0–3.5 °C и соленостью 34.0–34.1 ‰, формирующийся за счет адвекции тихоокеанских вод. На прибрежном шельфе этот слой не прослеживается. Между поверхностным и теплым слоями после термоклина залегает холодный промежуточный слой, который прослеживается на глубинах от 50 до 250 м. Его ядро с минимальными значениями температуры (1.83–1.85 °C) и соленостью 33.8–33.9 ‰ локализовано на глубинах 120–160 м в зоне континентального склона. На прибрежном шельфе температура в этом слое заметно выше. В глубоководной части разреза прослеживается воздействие антициклонического вихря, которое идентифицируется по куполообразному заглублению изотермы 2 °C до 270 м. Таким образом, гидрологический разрез фиксирует локальные аномалии, индуцированные этим вихрем, который оказывает определяющее влияние на вертикальное распределение ХПС.

На гидрологическом разрезе, выполненном в 2025 г. (рисунках 4в, г), вертикальная структура вод также демонстрирует трехслойное распределение, однако с рядом отличий. Поверхностный слой характеризуется более высокими температурами (13.0–14.5 °C) и пониженной соленостью (31.1–31.6 ‰). Максимальные значения температуры (до 14.9 °C) и минимальные значения солености (до 31.1 ‰) наблюдаются в прибрежной зоне шельфа. Ниже, на глубинах более 200–300 м, располагается теплый промежуточный слой с температурой и соленостью, аналогичными прошлогодним (3.0–3.5 °C и 34.0–34.1 ‰ соответственно). Холодный промежуточный слой, залегающий между поверхностным и теплым слоями на глубинах от 50 до 300 м, в 2025 г. имеет более сложную пространственную структуру по сравнению с 2024 г. Ядро слоя с

минимальными значениями температуры (1.80–1.85 °С) и соленостью 33.8–33.9 ‰ локализовано на глубинах 120–160 м в зоне бровки шельфа. Присутствие ХПС прослеживается на всем разрезе. Максимальное заглубление изотермы 2 °С наблюдается сразу за бровкой шельфа на континентальном склоне, при этом область ХПС прижата к шельфу на глубинах до 320 м.

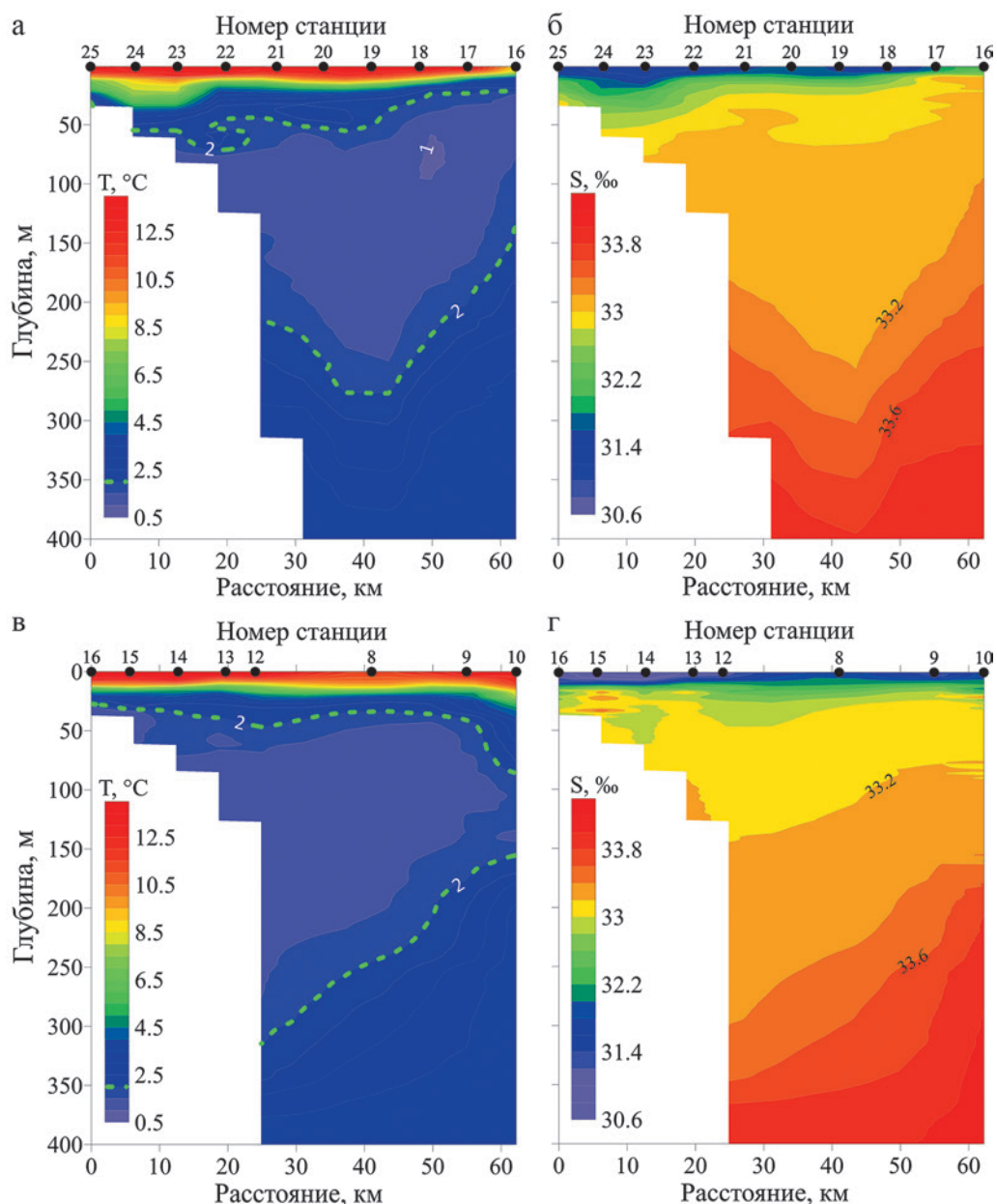


Рис. 4 – Вертикальные разрезы через антициклонические вихри в Авачинском заливе: **а** – температура, 2024 г.; **б** – соленость, 2024 г.; **в** – температура, 2025 г.; **г** – соленость, 2025 г. Географическое положение станций показано на рисунке 2

Холодный промежуточный слой в 2025 г. на разрезе характеризовался несколько более низкими минимальными температурами ядра (1.80 °С против 1.83 °С) и большей вертикальной протяженностью (до 320 м против 270 м). Наиболее существенное

различие заключается в пространственном положении ХПС: в 2024 г. ядро слоя было смещено в глубоководную часть разреза под влиянием антициклонического вихря, тогда как в 2025 г. область ХПС оказалась прижата к шельфу, а заглупление изотермы 2 °С зафиксировано непосредственно за бровкой шельфа. Наряду с температурными аномалиями, в ядре антициклонического вихря 2024 г. зафиксировано понижение солености на 0.1–0.15 ‰ относительно фоновых значений на тех же горизонтах. В 2025 г. соленостная аномалия локализована преимущественно у бровки шельфа и на континентальном склоне, где ее величина достигает 0.2 ‰, что свидетельствует о межгодовых различиях в характере перераспределения водных масс под влиянием вихревых структур в шельфовой и склоновой областях залива. Таким образом, положение антициклонического вихря может значимо влиять на пространственные характеристики холодного промежуточного слоя, включая глубину залегания его ядра и вертикальную протяженность, в акватории Авачинского залива.

Данные, приведенные в таблицах 1 и 2, позволяют количественно оценить изменчивость параметров ХПС на рассматриваемой акватории с учетом разного числа выполненных станций. В таблицах отражено основное различие между глубоководной зоной и шельфом, которое заключается в особенностях вертикальной структуры: в глубоководной части прослеживается трехслойная структура, что дает возможность оценить верхнюю и нижнюю границы ХПС, а также положение его ядра. На шельфе же регистрируются преимущественно поверхностный слой и верхняя граница ХПС (изотерма 2 °С), что затрудняет количественную оценку нижней границы слоя и положения его ядра.

Табл. 1 – Характеристики ХПС по годам в глубоководных районах

Год	Станции с ХПС, шт	Глубина верхней границы, м	Глубина ядра, м	Температура ядра, °С	Глубина нижней границы, м
		Среднее значение (минимальное – максимальное)			
2024	14	39 (20–58)	97 (32–175)	1.1 (0.9–1.5)	241 (140–300)
2025	23	41 (20–86)	101 (58–170)	1.1 (0.6–1.5)	260 (158–340)

Табл. 2 – Характеристики ХПС по годам на шельфе

Год	Станции с ХПС, шт	Глубина верхней границы, м	Глубина минимальной температуры, м
		Среднее значение (минимальное – максимальное)	
2024	7	39 (27–55)	87 (57–108)
2025	19	32 (20–48)	80 (37–152)

По данным 2024 г. наблюдалась одинаковая средняя глубина верхней границы ХПС в обоих районах, тогда как в 2025 г. верхняя граница на шельфе располагалась ближе к поверхности. В глубоководной части залива межгодовые различия проявились в заглуплении нижней границы ХПС при сохранении близких средних значений

температуры ядра и глубины верхней границы. Указанные различия, вероятнее всего, обусловлены влиянием антициклонических вихрей. В 2024 г. вихрь был смещен в глубоководную область, что вызывало заглубление изотермы 2 °С и перераспределение водных масс, способствуя формированию более глубокого залегания ядра ХПС в открытой части залива. В 2025 г. вихрь локализовался в зоне континентального склона, что, предположительно, привело к адвекции холодных вод на шельф, а также к увеличению неоднородности характеристик ХПС в прибрежной зоне.

Дополнительно, с целью подтверждения влияния вихревых структур на вертикальное положение ХПС, проводилось сравнение данных о вертикальной структуре профилей температуры в двух областях: в районе, удаленном от шельфа и находившемся в зоне воздействия вихря в 2024 г. (рисунок 1, квадрат 1), а также в области над континентальным склоном, где влияние вихря проявилось наиболее значимо в 2025 г. (рисунок 1, квадрат 2).

В районе, удаленном от шельфа, в 2024 г. зафиксировано максимальное отклонение от климатической нормы: верхняя граница ХПС поднялась на 30 м выше (мельче), а нижняя граница заглубилась почти на 50 м, что привело к значительному расширению слоя (рисунок 5а). В 2025 г. в этой же области отклонения были менее выраженными. Напротив, в области над континентальным склоном максимальные положительные аномалии вертикального развития ХПС отмечены в 2025 г. (рисунок 5б): верхняя граница поднялась на 10 м выше климатической нормы, а нижняя граница опустилась на 60 м, тогда как в 2024 г. вертикальное развитие ХПС здесь практически соответствовало климатической норме.

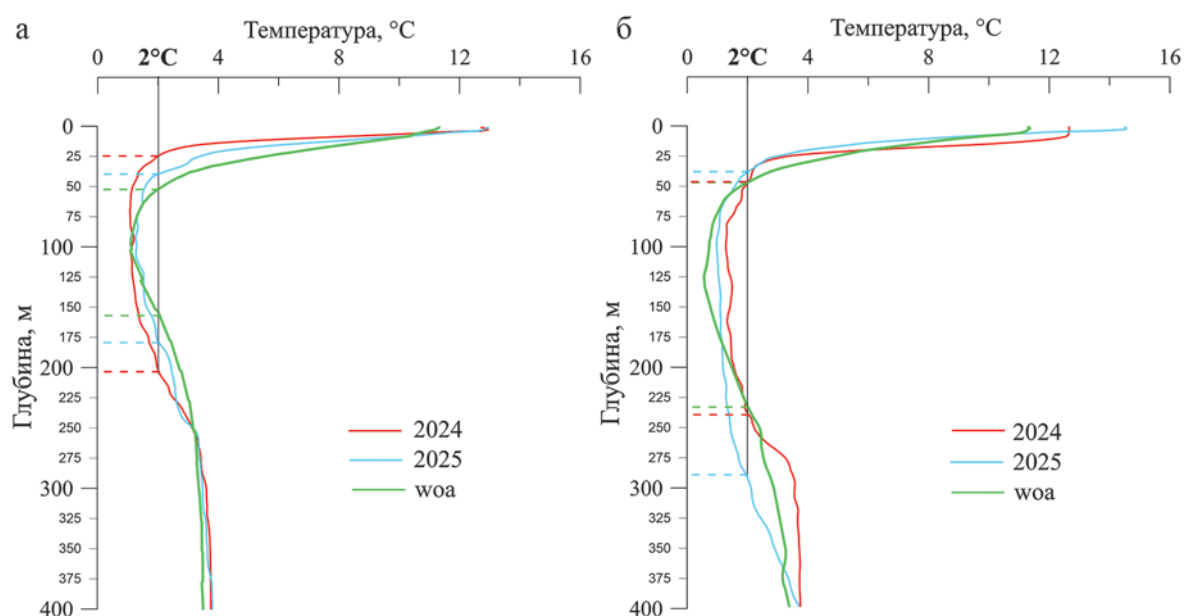


Рис. 5 – Вертикальные профили температуры для различных районов Авачинского залива: **а** – район, удаленный от шельфа (квадрат 1 на рис. 1); **б** – район над континентальным склоном (квадрат 2 на рис. 1). Показаны данные экспедиций 2024, 2025 гг. и климатологии WOA

Распределение температур на профилях подтверждает гипотезу о роли положения антициклонических вихрей в формировании аномалий ХПС. В 2024 г. вихрь, смещенный в глубоководную область, способствовал максимальному расширению ХПС относительно климатической нормы в зоне, удаленной от шельфа. В 2025 г. вихрь локализовался над континентальным склоном, что также обусловило увеличение глубины залегания нижней границы ХПС.

Таким образом, пространственное положение антициклонических вихрей определяет локализацию аномалий ХПС, что вне шельфа в первую очередь влияет на глубину залегания его нижней границы.

Заключение

На основе комплекса спутниковых альтиметрических данных и судовых CTD-измерений, выполненных в 2024 и 2025 гг., установлено, что в оба исследуемых периода в акватории залива присутствовали антициклонические вихри, формировавшиеся в районе мыса Шипунского и смещавшиеся в южном направлении. При этом выявлены существенные межгодовые различия в их морфометрических и динамических характеристиках. Вихрь 2024 г. характеризовался вытянутой формой, большими пространственными масштабами (эффективный радиус до 78 км, площадь до 14 500 км²) и максимальной геострофической скоростью 21 см/с, тогда как вихрь 2025 г. был более компактным и симметричным (эффективный радиус до 53 км, площадь до 9200 км², скорость 25 см/с). Положение вихрей также различалось: в 2024 г. вихрь был смещен в глубоководную область, в 2025 г. локализовался над континентальным склоном.

Анализ гидрологической структуры показал, что пространственное положение вихря определяет характер трансформации ХПС. В 2024 г., при локализации вихря в глубоководной части, ядро ХПС залегало на средних глубинах 97 м, а нижняя граница опускалась до 241 м. В 2025 г., когда вихрь находился над континентальным склоном, область ХПС оказалась прижата к шельфу, средняя глубина ядра незначительно увеличилась, а максимальное заглубление нижней границы ХПС достигло 320 м. При этом отмечено влияние вихря на характеристики ХПС на шельфе.

Сопоставление с данными WOA позволило оценить аномалии вертикального развития ХПС, связанные с положением вихрей. В 2024 г. в зоне, удаленной от шельфа, верхняя граница ХПС поднялась на 30 м выше среднееголетних значений, а нижняя заглубилась почти на 50 м, что привело к максимальному расширению слоя. В 2025 г. наибольшие отклонения (заглубление нижней границы на 60 м) наблюдались над континентальным склоном – в области непосредственного воздействия вихря.

Стоит отметить, что, несмотря на общую природу формирования, обусловленную Восточно-Камчатским течением как источником энергии, отклик ХПС на пространственное положение вихрей различался по годам. В 2024 г. доминирующим эффектом выступило заглубление нижней границы слоя в глубоководной части залива, тогда как в 2025 г. наблюдалось прижатие холодных и относительно распресненных вод к

континентальному склону с их последующей адвекцией в шельфовую зону. Это позволяет предположить, что именно пространственная локализация относительно континентального склона и бровки шельфа является фактором, контролирующим вертикальную структуру температуры и солености вод в прибрежной зоне. При этом наиболее чувствительным параметром выступает глубина залегания нижней границы ХПС, изменявшаяся на величину до 100 м в отдельных районах.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что пространственная локализация антициклонических вихрей с холодным ядром является ключевым фактором, определяющим межгодовую изменчивость вертикальной структуры ХПС в Авачинском заливе, а глубина залегания нижней границы слоя выступает наиболее чувствительным и информативным индикатором вихревого воздействия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028). Экспедиция и сбор материала выполнены в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» по теме «Подготовка молодого кадрового резерва в области морских наук по научно-образовательной программе «Плавучий университет» на основе комплексных исследований экосистемы дальневосточных морей России» (проекты № 075-03-2025-662/8 и № 075-03-2025-421/5).

Список литературы

1. Антонов Н. П., Датский А. В., Смирнов А. А., Кузнецова Е. В., Ведищева Е. В., Головатюк Г. Ю. Использование сырьевой базы морских рыб в российских водах дальневосточных морей и прилегающих районах открытой части Тихого океана в 2000–2020 гг. // Труды ВНИРО. 2024. Т. 195. С. 61–128. EDN: GIMEAY. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128>
2. Бережинский О. А., Зимин А. В., Шнар В. Н. Программный комплекс для обработки, хранения и анализа океанологических данных, получаемых с помощью различных СТД-зондов. В кн.: Сборник трудов научно-практической конференции «Перспективы развития рыбохозяйственного комплекса России – XXI век»; ВНИРО. М., 2002. С. 34–35.
3. Богданов К. Т., Мороз В. В. Воды Курило-Камчатского течения и течения Ойясио. Владивосток: Дальнаука, 2004. 138 с. ISBN: 5-8044-0438-5. EDN: QKEOIR
4. Буслов А. В., Тепнин О. Б., Дубинина А. Ю. Весенний ихтиопланктон в районе глубоководных каньонов Авачинского залива (восточная Камчатка) // Известия ТИНРО. 2006. Т. 144. С. 226–246. EDN: HYZCXX
5. Ванин Н. С. Термическая структура вод в северо-западной части Тихого океана и роль ветра и адвекции в ее формировании // Известия ТИНРО. 2017. Т. 190. С. 146–158. EDN: ZEGIFV. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2017-190-146-158>
6. Вакульская Н. М., Дубина В. А., Плотников В. В. Вихревая структура Восточно-Камчатского течения по спутниковым наблюдениям // Физика геосфер. 2019. Вып. 1. С. 73–81. EDN: RFYYTR. <https://doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007>
7. Врублевский М. В., Коник А. А., Атаджанова О. А. Анализ мезомасштабной вихревой структуры по данным мультиспектральных спутниковых и гидрологических измерений в Авачинском заливе в летний период 2024 г. // Современные проблемы дистанционного

- зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 260–273. EDN: DUOWIZ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-260-273>
8. Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А., Свергун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б. Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 16–35. EDN: VPBEOU
 9. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А., Тепнин О. Б. Оценка точности глобальных океанических реанализов в воспроизведении температуры и солености вод Авачинского залива (Тихий океан) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18. № 3. С. 101–113. EDN: VTSXBC. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-8)
 10. Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А., Свергун Е. И., Романенков Д. А., Софьина Е. В., Варкентин А. И., Тепнин О. Б., Саушкина Д. Я. Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период нереста // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17. № 4. С. 77–89. EDN: OZPOOW. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
 11. Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И. Формирование холодного промежуточного слоя в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 58–71. EDN: YTCWVR. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
 12. Лобанов В. Б., Сергеев А. Ф., Семкин П. Ю., Лукьянова Н. Б., Цой В., Тищенко П. П., Алексеев И. Ф., Кукла С. П., Мазур А. А., Обрезкова М. С., Прушковская И. А., Сагалаев С. Г., Тибенко Е. Ю., Федоров М. С., Швецова М. Г., Юрцев А. Ю. Исследование абиотических факторов, определяющих динамику морских экосистем и формирование аномальных условий в прибрежных водах Дальнего Востока, в 80-м рейсе НИС «Профессор Гагаринский» // Океанология. 2023. Т. 63. № 6. С. 1027–1030. EDN: QWAGBL. <https://doi.org/10.31857/S0030157423060084>
 13. Никитин О. П., Жуковский В. С. Камчатское течение по данным дрейфтерных наблюдений 1992–2023 гг. В кн.: Сборник трудов 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»; Институт космических исследований РАН. М., 2023. 235 с. EDN: PZERJM
 14. Орлова Т. Ю., Селина М. С., Стоник И. В., Морозова Т. В., Бегун А. А., Лепская Е. В. Фитопланктон прибрежных вод Камчатки и сопредельных акваторий / Под общ. ред. А. В. Адрианова. Владивосток: ЛИТ, 2024. 184 с. EDN: YULNPY
 15. Пранц С. В. Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 387–400. EDN: ESTQDT. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040106>
 16. Рогачев К. А., Шлык Н. В. Роль мезомасштабных вихрей в динамике Камчатского и Аляскинского течений // Известия ТИНРО. 2006. Т. 145. С. 228–234. EDN: HYZDGT
 17. Романенков Д. А., Софьина Е. В., Маховиков А. Д., Виноградова И. К., Варкентин А. И., Зимин А. В., Мельник Д. Я. Моделирование переноса икры и личинок восточнокамчатского минтая с учетом приливной динамики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18. № 4. С. 105–119. EDN: QVQQSG. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-8)
 18. Степанова Н. Б. Свойства холодного промежуточного слоя в Юго-Восточной Балтике по экспедиционным данным 2004–2008 гг. и возможность его вентиляции водами шельфа в весенний период // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 3 (19). С. 187–195. EDN: QIXKGV
 19. Тепнин О. Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических

- ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93. EDN: WPQKWL. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
20. Трусенкова О. О., Кустова Е. В. Сезонная и межгодовая изменчивость Восточно-Камчатского течения // Исследование Земли из космоса. 2026. № 3. С. 3–14. EDN: OHWXST. <https://doi.org/10.7868/S3034540526030017>
 21. Шевченко Г. В., Романов А. А. Сезонная изменчивость циркуляции в верхнем слое Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 59–71. EDN: JSGUIU
 22. Шевченко Г. В., Частиков В. Н., Ульченко В. А. Особенности гидрологического режима у тихоокеанского побережья северных Курильских островов по данным судовых океано-логических съемок // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41. № 2 (242). С. 229–246. EDN: WNLYFE
 23. Чубаренко И. П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с. ISBN: 978-5-98777-050-4. EDN: UBCINF
 24. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. Vol. 91. No. 2. P. 167–216. EDN: YBYDIJ. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2011.01.002>
 25. Itoh S., Yasuda I. Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio–Oyashio Extension region detected from the distribution of the sea surface height anomaly // Journal of Physical Oceanography. 2010. Vol. 40. No. 5. P. 1018–1034. EDN: MYSDCF. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4265.1>
 26. L'Her A., Reinert M., Prants S., Carton X., Morvan M. Eddy formation in the bays of Kamchatka and fluxes to the open ocean // Ocean Dynamics. 2021. Vol. 71. No. 5. P. 601–612. EDN: KYBZYE. <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01449-w>
 27. Pegliasco C., Delepoulle A., Mason E., Morrow R., Faugère Y., Dibarboure G. META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 1087–1107. EDN: OEPRGE. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>
 28. 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. Vol. 11. No. 2. Article 208. EDN: VNCAHR. <https://doi.org/10.3390/rs11020208>
 29. Ueno H., Yasuda I. Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. Vol. 105. No. C7. P. 16885–16897. <https://doi.org/10.1029/2000JC900020>
 30. Zhou J., Zhou G., Liu H., Li Z., Cheng X. Mesoscale eddy-induced ocean dynamic and thermodynamic anomalies in the North Pacific // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. Article 756918. EDN: BTRDVN. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.756918>
 31. Zimin A., Svergun E., Sofina E., Romanenkov D., Varkentin A., Konik A., Atadzhanova O., Makhovikov A., Vinogradova I. Interannual variability of nonlinear internal wave characteristics in the Pacific Ocean off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Article 1662937. EDN: GNWFAF. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1662937>

Статья поступила в редакцию 12.05.2026, одобрена к печати 27.07.2026.

Для цитирования: Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А., Швец П. А., Герасимов И. А. Влияние антициклонических вихрей на вертикальное распределение холодного промежуточного слоя в Авачинском заливе по данным наблюдений в летние сезоны 2024–2025 гг. // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 75–94. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(3\).5](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).5)

**THE INFLUENCE OF ANTICYCLONIC EDDIES ON THE VERTICAL
DISTRIBUTION OF THE COLD INTERMEDIATE LAYER IN AVACHA BAY
BASED ON OBSERVATIONAL DATA FROM THE SUMMER SEASONS
OF 2024–2025**

A. V. Zimin¹, O. A. Atadzhanova¹, A. A. Konik^{1,2}, P. A. Shvets^{1,3}, I. A. Gerasimov²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia;*

³ *Russian State Hydrometeorological University,
79, Voronezhskaya street, Saint Petersburg, 192007, Russia
e-mail: zimin2@mail.ru*

Of particular interest in Avacha Bay, as a significant fishing area in the northwestern Pacific Ocean, are cold-core anticyclonic eddies that are rarely encountered elsewhere in the ocean. In this regard, the aim of the present study is to assess the nature of their influence on the vertical distribution of the Cold Intermediate Layer (CIL) in the bay during the summer period. Satellite altimetry data and shipboard CTD measurements collected during two expeditions in 2024 and 2025 were used. It was established that in both years anticyclonic eddies were present in the water area, forming near Cape Shipunsky and propagating southward into the bay; however, their positions during the expedition periods differed: in 2024 the eddy was displaced into the deep-water region, whereas in 2025 it was localized over the continental slope. In 2024, maximum expansion of the CIL was recorded in the zone distant from the shelf (a 30 m shoaling of the upper boundary and a 50 m deepening of the lower boundary relative to climatological values). In 2025, the greatest anomalies were observed over the continental slope (deepening of the lower boundary by more than 60 m), with cold waters pressed against the shelf; a transformation of the CIL in the coastal zone was also noted, most likely attributable to advection of waters from the eddy. It is concluded that the spatial localization of anticyclonic eddies is an important factor governing the interannual variability of the vertical structure of the CIL, with the depth of its lower boundary undergoing the most pronounced changes.

Keywords: Cold Intermediate Layer, anticyclonic eddies, satellite altimetry, CTD measurements, interannual variability, Avacha Bay

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (topic No. FMWE-2024-0028). Marine expedition and sample collections were carried out within the framework of the Russian national research and educational program «Floating University» (projects № 075-03-2025-662/8 and № 075-03-2025-421/5).

References

1. Antonov, N. P., A. V. Datsky, A. A. Smirnov, E. V. Kuznetsova, E. V. Vedishcheva, and G. Yu. Golovatyuk, 2024: Exploitation of marine fish resources in Russian waters of the Far

- Eastern seas and adjacent areas of the open Pacific Ocean in 2000–2020. *Trudy VNIRO*, **195**, 61–128, EDN: [GIMEAY](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128), <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128>
2. Berezhtinsky, O. A., A. V. Zimin, and V. N. Shnar, 2002: Programmnyj kompleks dlya obrabotki, hraneniya i analiza okeanologicheskikh dannyh, poluchaemyh s pomoshch'yu razlichnyh STD-zondov (A software package for processing, storage and analysis of oceanographic data acquired by various CTD probes). *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Prospects for the Development of the Russian Fisheries Complex – 21st Century”*, VNIRO, Moscow, 34–35.
3. Bogdanov, K. T. and V. V. Moroz, 2004: *Vody Kurilo-Kamchatskogo techeniya i techeniya Oyasio* (Waters of the Kuril-Kamchatka Current and the Oyashio Current). Vladivostok, Dal'nauka, 138 p., ISBN: 5-8044-0438-5, EDN: [QKEOIR](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128)
4. Buslov, A. V., O. B. Tepnin, and A. Yu. Dubinina, 2006: Spring ichthyoplankton in the area of deep-sea canyons of Avacha Bay (eastern Kamchatka). *Izvestiya TINRO*, **144**, 226–246, EDN: [HYZCXX](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128)
5. Chelton, D. B., M. G. Schlax, and R. M. Samelson, 2011: Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, **91** (2), 167–216, EDN: [YBYDIJ](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002), <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
6. Chubarenko, I. P., 2010: *Horizontal Convection over Underwater Slopes*. Kaliningrad, Terra Baltika, 256 p., ISBN: 978-5-98777-050-4, EDN: [UBCINF](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128)
7. Itoh, S. and I. Yasuda, 2010: Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio-Oyashio Extension region detected from the distribution of the sea surface height anomaly. *Journal of Physical Oceanography*, **40** (5), 1018–1034, EDN: [MYSDCF](https://doi.org/10.1175/2009JPO4265.1), <https://doi.org/10.1175/2009JPO4265.1>
8. Konik, A. A., A. V. Zimin, O. A. Atadzhanova, E. I. Svergun, D. A. Romanenkov, E. V. Sofina, A. I. Varkentin, O. B. Tepnin, and D. J. Saushkina, 2024: Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay: A field experiment during the spawning period. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, **17** (4), 77–89, EDN: [OZPOOW](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6), [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
9. Kuklyev, S. B., A. G. Zatsepin, and O. I. Podymov, 2019: Formation of the Cold Intermediate Layer in the shelf-slope zone of the northeastern Black Sea. *Journal of Oceanological Research*, **47** (3), 58–71, EDN: [YTCWVR](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5), [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
10. L'Her, A., M. Reinert, S. Prants, X. Carton, and M. Morvan, 2021: Eddy formation in the bays of Kamchatka and fluxes to the open ocean. *Ocean Dynamics*, **71** (5), 601–612, EDN: [KYBZYE](https://doi.org/10.1007/s10236-021-01449-w), <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01449-w>
11. Lobanov, V. B., A. F. Sergeev, P. Yu. Semkin, N. B. Luk'yanova, V. Tsoy, P. P. Tishchenko, I. F. Alekseev, S. P. Kukla, A. A. Mazur, M. S. Obrezkova, I. A. Prushkovskaya, S. G. Sagalaev, E. Yu. Tibenko, M. S. Fedorov, M. G. Shvetsova, and A. Yu. Yurtsev, 2023: Investigation of abiotic factors governing marine ecosystem dynamics and anomalous conditions in the coastal waters of the Russian Far East during cruise 80 of R/V “Professor Gagarinsky”. *Oceanology*, **63** (6), 1027–1030, EDN: [QWAGBL](https://doi.org/10.31857/S0030157423060084), <https://doi.org/10.31857/S0030157423060084>
12. Nikitin, O. P. and V. S. Zhukovsky, 2023: The Kamchatka Current from drifter observations in 1992–2023. *Proceedings of the 21st International Conference “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”*, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, Moscow, **235**, EDN: [PZERJM](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128)
13. Orlova, T. Yu., M. S. Selina, I. V. Stonik, T. V. Morozova, A. A. Begun, and E. V. Lepskaya, 2024: *Phytoplankton of Coastal Waters of Kamchatka and Adjacent Areas*. Ed. by A. V. Adrianov. Vladivostok, LIT, 184 p., EDN: [YULNPY](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-61-128)
14. Pegliasco, C., A. Delepoulle, E. Mason, R. Morrow, Y. Faugère, and G. Dibarboure, 2022: META3.lexp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry. *Earth System Science Data*, **14**, 1087–1107, EDN: [OEPRGE](https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022), <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>

15. Prants, S. V., 2021: Eddies of deep-sea trenches in the northwestern Pacific Ocean: a review. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **57** (4), 387–400, EDN: ESTQDT, <https://doi.org/10.31857/S0002351521040106>
16. Rogachev, K. A. and N. V. Shlyk, 2006: The role of mesoscale eddies in the dynamics of the Kamchatka and Alaska Currents. *Izvestiya TINRO*, **145**, 228–234, EDN: HYZDGT
17. Romanenkov, D. A., E. V. Sof'ina, A. D. Makhovikov, I. K. Vinogradova, A. I. Varkentin, A. V. Zimin, and D. Ya. Mel'nik, 2025: Modelling of egg and larval transport of the eastern Kamchatka pollock with account for tidal dynamics. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, **18** (4), 105–119, EDN: QVQQSG, [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-8)
18. Shevchenko, G. V. and A. A. Romanov, 2006: Seasonal variability of circulation in the upper layer of the Okhotsk Sea from satellite altimetry data. *Meteorologiya i Gidrologiya*, **8**, 59–71, EDN: JSGUIU
19. Shevchenko, G. V., V. N. Chastikov, and V. A. Ul'chenko, 2025: Hydrological regime features off the Pacific coast of the northern Kuril Islands from shipboard oceanographic surveys. *Physical Oceanography*, **41**, **2** (242), 229–246, EDN: WNLYFE
20. Stepanova, N. B., 2013: Properties of the Cold Intermediate Layer in the southeastern Baltic Sea from expedition data of 2004–2008 and the possibility of its ventilation by shelf waters in spring. *Trudy MFTI*, **5**, **3** (19), 187–195, EDN: QIXKGV
21. Sun, W., C. Dong, W. Tan, and Y. He, 2019: Statistical characteristics of cyclonic warm-core eddies and anticyclonic cold-core eddies in the North Pacific based on remote sensing data. *Remote Sensing*, **11** (2), Article 208, EDN: VNCAHR, <https://doi.org/10.3390/rs11020208>
22. Tepnin, O. B., 2022: Variability of hydrological conditions at spawning grounds of the eastern Kamchatka pollock (*Gadus chalcogrammus*) in 2012–2022. *Issledovaniya Vodnykh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoy Chasti Tikhogo Okeana*, **66**, 79–93, EDN: WPQKWL, <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
23. Trusenкова, O. O. and E. V. Kustova, 2026: Seasonal and interannual variability of the East Kamchatka Current. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, **3**, 3–14, EDN: OHWXST, <https://doi.org/10.7868/S3034540526030017>
24. Ueno, H. and I. Yasuda, 2000: Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **105** (C7), 16885–16897, <https://doi.org/10.1029/2000JC900020>
25. Vakulskaia, N. M., V. A. Dubina, and V. V. Plotnikov, 2019: Eddy structure of the East Kamchatka Current from satellite observations. *Fizika Geosfer*, **1**, 73–81, EDN: RFYYTR, <https://doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007>
26. Vanin, N. S., 2017: Thermal structure of waters in the northwestern Pacific Ocean and the role of wind and advection in its formation. *Izvestiya TINRO*, **190**, 146–158, EDN: ZEGIFV, <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2017-190-146-158>
27. Vrublevsky, M. V., A. A. Konik, and O. A. Atadzhanova, 2025: Analysis of mesoscale eddy structure from multispectral satellite and hydrological measurements in Avacha Bay in summer 2024. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, **22** (6), 260–273, EDN: DUOWIZ, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-260-273>
28. Zhou, J., G. Zhou, H. Liu, Z. Li, and X. Cheng, 2021: Mesoscale eddy-induced ocean dynamic and thermodynamic anomalies in the North Pacific. *Frontiers in Marine Science*, **8**, Article 756918. EDN: BTRDVN, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.756918>
29. Zimin, A. V., O. A. Atadzhanova, A. A. Konik, and O. B. Tepnin, 2025: Accuracy assessment of global ocean reanalyses in reproducing temperature and salinity in Avacha Bay (Pacific Ocean). *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, **18** (3), 101–113, EDN: VTSXBC, [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-8)

30. Zimin, A. V., D. A. Romanenkov, A. A. Konik, O. A. Atadzhanova, E. I. Svergun, A. I. Varkentin, and O. B. Tepnin, 2024: Multi-scale eddy dynamics in the Pacific Ocean adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoy i Shel'fovoy Zon Morya*, **3**, 16–35, EDN: VPBEOU
31. Zimin, A., E. Svergun, E. Sofina, D. Romanenkov, A. Varkentin, A. Konik, O. Atadzhanova, A. Makhovikov, and I. Vinogradova, 2025: Interannual variability of nonlinear internal wave characteristics in the Pacific Ocean off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Frontiers in Marine Science*, **12**, Article 1662937, <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1662937>

Submitted 12.05.2026, accepted 27.07.2026.

For citation: Zimin, A. V., O. A. Atadzhanova, A. A. Konik, P. A. Shvets, and I. A. Gerasimov, 2026: The influence of anticyclonic eddies on the vertical distribution of the cold intermediate layer in Avacha Bay based on observational data from the summer seasons of 2024–2025. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 75–94, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(3\).5](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).5)

2024–2025年夏季观测数据揭示的反气旋涡旋对阿瓦恰湾冷中间层垂直分布的影响

A. V. Zimin¹, O. A. Atadzhanova¹, A. A. Konik^{1,2}, P. A. Shvets^{1,3}, I. A. Gerasimov²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia;

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 邮编: 141701, Russia;

³ Russian State Hydrometeorological University,
79, Voronezhskaya street, Saint Petersburg, 邮编: 192007, Russia
电子邮件: zimin2@mail.ru

在西北太平洋重要的渔业区——阿瓦恰湾，具有冷核的反气旋涡旋（在其他海域较为罕见）具有特殊的研究意义。本研究旨在评估夏季该类涡旋对海湾冷中间层垂直分布的影响。使用了卫星高度计数据以及2024年和2025年两次考察期间采集的船载CTD测量数据。结果表明，两年中调查海域均存在反气旋涡旋，这些涡旋形成于希普恩斯基角并向海湾南部移动，但在考察期间的位置有所差异：2024年涡旋向深水区域偏移，而2025年则位于大陆坡上方。2024年记录到冷中间层在远离陆架区域的最大扩张（上界抬升30米，下界较气候平均深度下沉50米）。2025年最大异常出现在大陆坡上方（下界下沉超过60米），并伴有冷水向陆架挤压；同时在近岸带也观测到冷中间层的改造，这很可能与涡旋水体的平流输送有关。研究表明，反气旋涡旋的空间分布是冷中间层垂直结构年际变化的重要控制因子，其中其下界深度的变化最为显著。

关键词：冷中间层，反气旋涡旋，卫星高度计，CTD测量，年际变化，阿瓦恰湾

致谢： 本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部下达给 Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences 的国家任务（课题编号：FMWE-2024-0028）框架内完成。海洋考察和样本采集是在俄罗斯国家科研教育项目“浮动大学”框架内进行的（项目编号：075-03-2025-662/8和075-03-2025-421/5）。