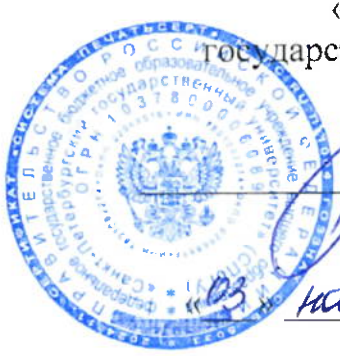
«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный университет»



_____ С. В. Микушев

«03» ноября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Удалова Александра Алексеевича «Свойства и лагранжев анализ мезомасштабных вихрей в северо-западной части Тихого океана», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология

Общая характеристика диссертации. Диссертация А. А. Удалова посвящена комплексному исследованию мезомасштабных вихрей в трёх ключевых районах северо-западной части Тихого океана: в Курило-Камчатском жёлобе, Курильской котловине Охотского моря и северной части Японского моря. Работа выполнена на основе многолетних спутниковых альтиметрических данных с применением автоматического алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA, лагранжева анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров, а также верификации по натурным данным (судовые CTD-измерения, дрейфующие буи, спутниковая радиометрия MODIS) и вихреразрешающему реанализу GLORYS12V1.

Актуальность работы определяется фундаментальной ролью мезомасштабных вихрей в динамике океана. Вихри диаметром 50–300 км с временем жизни от нескольких недель до нескольких лет занимают порядка трети площади Мирового океана и наряду с течениями ответственны за перенос массы, тепла, соли, биогенных элементов и загрязняющих веществ.

Влияя на перемешивание и водообмен, они формируют продуктивные рыбопромысловые зоны, участвуют в вентиляции промежуточных вод и в региональных климатических процессах. Северо-западная часть Тихого океана — один из наиболее благоприятных районов для изучения этих процессов: здесь сочетаются выраженные фронтальные разделы субтропических и субарктических вод, глубоководные котловины Японского и Охотского морей и Курило-Камчатский жёлоб, служащий проводником долгоживущих вихрей. Однако накопленные к настоящему времени сведения о вихрях региона фрагментарны: исследования, как правило, ограничиваются либо отдельными субрегионами, либо одним из аспектов — статистикой, кинематикой или переносом вод. Комплексного исследования, объединяющего многолетнюю статистику вихрей, их кинематические характеристики и лагранжево моделирование переноса водных масс для Курило-Камчатского жёлоба, Курильской котловины и северной части Японского моря в рамках единой методологии, до настоящей работы не проводилось.

Научную новизну работы составляют следующие результаты. Разработан и верифицирован оригинальный метод посуточной количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей, основанный на совместном применении алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA и лагранжева анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров. Для Курило-Камчатского жёлоба за период спутниковой альтиметрии проведена систематическая перепись долгоживущих вихрей и количественно показано, что даже в юго-восточной части жёлоба доля трансформированных субтропических вод в ядрах вихрей не превышает 6%, из чего следует их преимущественно субарктическое происхождение. Впервые по спутниковым альтиметрическим данным и лагранжеву анализу охарактеризована совокупность долгоживущих вихрей Курильской котловины Охотского моря; установлено количественное преобладание циклонов над антициклонами (в 1,5 раза), которое не согласуется с прежними представлениями. В северо-восточной части Японского моря выявлено и количественно описано устойчивое пространственное разделение антициклонов и циклонов, объяснены причины этого явления. На основе комплекса натурных судовых измерений, спутниковой альтиметрии и лагранжева анализа детально прослежена эволюция долгоживущего прифронтового антициклона в северо-западной части Японского моря, ядро которого на 60–90% было заполнено субтропическими водами вплоть до разрушения вихря, показана способность таких структур переносить субтропические воды в субарктическую зону.

Достоверность и обоснованность результатов. Обоснованность приведённых результатов опирается на согласованность независимых источников информации. Оценки, полученные по альтиметрии и лагранжеву моделированию, сопоставлены с данными дрейфующих буёв, судовыми CTD-измерениями, спутниковыми картами температуры поверхности океана (MODIS) и вихреразрешающим реанализом GLORYS12V1. Сильной стороной работы является внутренняя непротиворечивость оценок, полученных принципиально разными методами: эйлеровым детектированием вихрей и лагранжевым моделированием переноса вод. Дополнительным подтверждением достоверности служат публикации в ведущих рецензируемых изданиях и многократная апробация на всероссийских и международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание роли мезомасштабных вихрей в динамике и водообмене дальневосточных морей России и прилегающей части Тихого океана. Данные о пространственно-временном распределении вихрей, их кинематических характеристиках и составе водных масс в ядрах могут быть использованы для улучшения океанических моделей, включая параметризацию вихревых процессов в моделях, не разрешающих мезомасштабную изменчивость. Практическая значимость обусловлена возможностью применения результатов для прогнозирования распространения экологически опасных веществ (нефтяных загрязнений, радионуклидов), изменений гидрологических условий в рыбопромысловых районах, планирования научных экспедиций и создания системы оперативного мониторинга вихревой активности.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Каждая глава снабжена подробной рубрикацией по параграфам. Объём и структура работы соответствуют поставленным цели и задачам.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе систематизированы современные методы идентификации мезомасштабных вихрей и лагранжева анализа, обоснован выбор алгоритма AMEDA и комплекса лагранжевых методов. Глава создаёт методическую основу для первого положения, выносимого на защиту.

Вторая глава посвящена вихрям Курило-Камчатского жёлоба. За период 1993–2021 гг. идентифицировано 2520 вихрей, из которых 992 — антициклоны и 1528 — циклоны; для долгоживущих вихрей (время жизни более 90 суток) — 219 антициклонов и 468 циклонов. Установлено

устойчивое преобладание циклонов над антициклонами. Показано, что антициклоны концентрируются вдоль оси жёлоба с максимумом в районе пролива Буссоль, а циклоны — на океанической стороне, над поднятием Хоккайдо. Более 90% долгоживущих вихрей являются нелинейными, что подтверждает их способность к эффективному адвективному переносу. С помощью лагранжева анализа впервые количественно оценены доли вод различного происхождения в ядрах вихрей: в западных субзонах преобладают субарктические воды, в восточных возрастает доля субтропических вод, но даже там она не превышает 6%. Результаты главы 2 непосредственно раскрывают положения 1 и 2, выносимые на защиту.

В третьей главе исследованы вихри Курильской котловины Охотского моря. Для всего Охотского моря без ограничения по времени жизни обнаружено 3293 вихря (1634 антициклона, 1659 циклонов). Для долгоживущих вихрей (более 30 суток) в глубоководной части Курильской котловины установлено количественное преобладание циклонов над антициклонами: 366 против 243, то есть в 1,5 раза. Этот результат опровергает прежние представления о доминировании антициклонов, основанные на визуальных наблюдениях и ограниченных натурных данных. Лагранжев анализ показал, что ядра вихрей обоих знаков на 60–80% состоят из вод открытого океана с выраженным максимумом в холодный сезон; вклад вод Восточно-Сахалинского течения и тёплого течения Соя существенно ниже и характеризуется сезонной изменчивостью. Проведено сравнение свойств вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского жёлоба: вихри котловины медленнее, имеют меньшие радиусы, но более высокую нелинейность. Валидация по данным дрейфующих буёв и реанализа GLORYS12V1 подтверждает корректность лагранжевых оценок. Содержание главы 3 соответствует положению 3 (и частично положению 1 в части применения лагранжева метода), выносимым на защиту.

Четвёртая глава содержит многолетнюю статистику, анализ эволюции и роли вихрей в водообмене северной части Японского моря. За 1993–2024 гг. в Японском море идентифицировано 2717 антициклонов и 3823 циклона с временем жизни более 30 суток; в среднем ежегодно в море образуется около 85 долгоживущих антициклонов и 120 циклонов; преобладание циклонов в 1,4 раза объясняется, в том числе, более высокой частотой их разделения. Выявлены зоны повышенной вихревой активности, связанные с топографией и неустойчивостью пограничных течений. В северо-западной части моря детально исследован долгоживущий антициклон А (время жизни 9 месяцев, с января по октябрь 2004 г.), ядро которого на 60–90% было заполнено субтропическими водами на протяжении всего жизненного цикла. Прослежены стадии формирования, роста, разделения, слияния,

максимального развития и разрушения вихря; подтверждена способность таких структур переносить субтропические воды через Субполярный фронт в субарктическую зону. В северо-восточной части моря впервые получены количественные оценки: в среднем за год образуется 21,7 долгоживущих антициклонов и 25,9 циклонов; более 95% вихрей являются нелинейными. Выявлена устойчивая пространственная сегрегация антициклонов и циклонов (индекс Жаккара для наиболее интенсивных очагов 1–3%), сохраняющаяся в течение всего года. С использованием гидродинамических диагностик объяснены механизмы этой сегрегации, связанные с динамикой пограничных течений и топографией. Материалы главы 4 относятся к положениям 4 и 5, а также к положению 1 (в части разработанного метода), выносимым на защиту.

В заключении подведены итоги работы и перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

Автореферат диссертации отражает её основное содержание и соответствует установленным требованиям.

Апробация и публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей в рецензируемых научных изданиях категории К1, индексируемых в международных базах данных: три статьи в журнале Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers (2023, 2024, 2026 гг.), две статьи в Ocean Dynamics (2024 г.) и по одной — в Progress in Oceanography, Oceanology, Physics of Fluids, Pure and Applied Geophysics и «Вестнике Санкт-Петербургского университета». Результаты доложены на всероссийских и международных конференциях («Комплексные исследования Мирового океана», «Океанологические исследования», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и др.). Работа выполнена при поддержке грантов РНФ и РФФИ. Результаты исследований включены в перечни важнейших научных достижений Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва ДВО РАН по итогам 2023 и 2025 гг.; соискатель отмечен стипендией Президента Российской Федерации. Личный вклад автора, охарактеризованный во введении, соответствует заявленным задачам: соискателем лично выполнены перепись вихрей, адаптация алгоритма AMEDA к региону, лагранжево моделирование и разработка методики оценки происхождения вод.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. В разных главах используются разные обозначения вихрей разной полярности («КАС»/«КС» во второй главе, «АЕ»/«СЕ» в третьей и четвёртой). Сокращения расшифрованы при первом употреблении в начале каждой главы, тем не менее единообразие терминологии на протяжении всего

текста облегчило бы восприятие работы и сопоставление результатов между главами.

2. Средние значения кинематических характеристик вихрей приводятся без оценок их разброса (стандартных отклонений или доверительных интервалов). Дополнение таблиц сведениями о вариабельности сделало бы статистические выводы ещё более убедительными.

3. Детектирование вихрей выполнено по спутниковым альтиметрическим полям разного пространственного разрешения (1/4° для Охотского моря и Курило-Камчатского жёлоба и до 1/8° для Японского моря). Возможно, имеет смысл упомянуть нижний предел пространственного разрешения методики и оговорить, насколько он может сказываться на представительности выборок для вихрей с малыми радиусами.

4. Индекс Жаккара, используемый в четвёртой главе для количественной оценки сегрегации вихрей, методически описан недостаточно подробно. Для методической полноты желательно было бы дать описание этого подхода.

Замечания носят рекомендательный характер и не затрагивают существа защищаемых положений и выводов диссертации.

Заключение. Диссертация Удалова Александра Алексеевича на тему «Свойства и лагранжев анализ мезомасштабных вихрей в северо-западной части Тихого океана» представляет собой завершённое исследование, в котором получены новые результаты, развивающие современные представления о генерации мезомасштабных вихрей, их пространственно-временном распределении и участии в водообмене в северо-западной части Тихого океана. Работа изложена полно и логично, её результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Диссертация соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология, а соискатель Удалов Александр Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Отзыв на диссертацию Удалова А. А. подготовлен профессором кафедры океанологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Зиминым Алексеем Вадимовичем, доктором географических наук (специальность 25.00.28 — океанология).

Отзыв ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Удалова А. А. обсуждён и одобрен на заседании кафедры океанологии Института наук о Земле федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» «14» октября 2026 года, протокол № 43/1/15-02-1.

И. о. заведующего кафедрой океанологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доктор географических наук, профессор

_____ Захарчук Евгений Александрович

Профессор кафедры океанологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доктор географических наук, доцент

_____ Зимин Алексей Вадимович

Личную подпись руки
Е.А. Захарчука; А.В. Зимина
ЗАВЕРЯЮ
Вед. специалист по кадрам Г.Ю.А. Гарелину

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9
Телефон: (812) 328-97-01
E-mail: spbu@spbu.ru
Сайт: http://www.spbu.ru