ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию Удалова Александра Алексеевича
«Свойства и лагранжев анализ мезомасштабных вихрей в северо-западной части Тихого океана», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – «Океанология»

Диссертационная работа А.А. Удалова посвящена исследованию свойств, пространственно-временной изменчивости и роли мезомасштабных вихрей в динамике вод северо-западной части Тихого океана. В работе рассматриваются три важных и существенно различающихся по своим океанографическим условиям региона: Курило-Камчатский желоб, Курильская котловина Охотского моря и северная часть Японского моря. Основу исследования составляет комплексное использование многолетних спутниковых альтиметрических данных, автоматического алгоритма детектирования и отслеживания вихрей Angular momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA), лагранжева анализа данных численных реанализов и натурных океанографических наблюдений.

Актуальность темы диссертации. Мезомасштабные вихри являются одним из важнейших элементов динамики Мирового океана. Они обеспечивают интенсивный горизонтальный и вертикальный перенос тепла, соли, растворенных веществ и биогенных элементов, оказывают влияние на водообмен, формирование термохалинной структуры, биологическую продуктивность и распространение загрязняющих веществ. Особую актуальность изучение мезомасштабной динамики имеет для дальневосточных морей России и прилегающей части Тихого океана. Здесь взаимодействуют воды различного происхождения, располагаются интенсивные пограничные течения и фронтальные зоны, а сложная топография дна существенно влияет на генерацию и эволюцию вихревых структур. При этом существовавшие до настоящего времени исследования отдельных районов не давали единой количественной характеристики вихревой динамики с использованием одинаковых методов детектирования и анализа. В этой связи избранная А.А. Удаловым тема представляется актуальной как с точки зрения фундаментальной физической океанологии, так и применительно к прикладным задачам оценки водообмена, биологической продуктивности, экологического мониторинга и совершенствования методов океанографического прогноза.

Цель работы сформулирована достаточно четко и состоит в комплексном исследовании свойств, динамики и роли мезомасштабных вихрей в Японском и Охотском морях и прилегающей части Тихого океана на основе многолетних спутниковых

альтиметрических данных с применением автоматических методов детектирования и лагранжева анализа. Поставленные для достижения этой цели задачи логически взаимосвязаны и последовательно решаются в главах диссертации.

Научная новизна и основные результаты работы. Научная новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений. К наиболее существенным результатам работы следует отнести разработку и верификацию метода количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей, основанного на совместном применении автоматического алгоритма AMEDA и лагранжева анализа ансамблей пассивных частиц. Метод позволяет прослеживать изменение состава вод в вихрях с суточным разрешением на протяжении их жизненного цикла.

В районе Курило-Камчатского желоба автором проведена систематическая перепись мезомасштабных вихрей за период 1993-2021 годов. Всего идентифицировано 2520 вихрей, из них 992 антициклонических и 1528 циклонических. Показано, что долгоживущие вихри преимущественно концентрируются в пределах желоба, причем их пространственное распределение существенно зависит от полярности. Более 90% исследованных долгоживущих вихрей являются нелинейными, что свидетельствует об их способности к эффективному переносу захваченных вод на значительные расстояния. Важным результатом является количественная оценка происхождения вод, захваченных вихрями Курило-Камчатского желоба. Показано, что в западных субзонах преобладают субарктические воды, а доля субтропических вод увеличивается в восточном направлении, однако даже в наиболее юго-восточной части исследуемого района не превышает 6%.

Для Курильской котловины Охотского моря впервые выполнена систематическая перепись вихрей и получен очень интересный результат, а именно, установлено количественное преобладание долгоживущих циклонических вихрей над антициклоническими: соответственно 366 и 243 вихря с продолжительностью жизни более 30 суток. Тем самым уточнены существовавшие ранее представления о характере вихревой динамики этого региона. Показано также, что ядра вихрей обоих знаков в значительной мере сформированы водами открытого океана, доля которых имеет выраженную сезонную изменчивость.

Значительный объем новых результатов получен для Японского моря. За период 1993-2024 годов идентифицировано 2717 антициклонических и 3823 циклонических вихря с продолжительностью жизни более 30 суток. Выявлены устойчивые пространственные закономерности их распределения, показана существенная роль топографии и динамики пограничных течений в формировании областей преимущественной генерации вихрей.

Особенно интересным представляется выявление пространственной сегрегации циклонических и антициклонических вихрей в северо-восточной части Японского моря. Отдельного внимания заслуживает детальное исследование долгоживущего антициклонического вихря в северо-западной части Японского моря. На основе сочетания спутниковых данных, лагранжева анализа и судовых измерений прослежены различные стадии его эволюции и показано, что значительная доля субтропических вод сохранялась в его ядре в течение практически всего жизненного цикла. Тем самым на конкретном примере продемонстрирована возможность эффективного переноса субтропических вод через субполярный фронт в субарктическую часть моря.

В целом полученные результаты существенно расширяют представления о мезомасштабной вихревой динамике дальневосточных морей России и прилегающей части Тихого океана.

Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечивается использованием продолжительных рядов современных спутниковых данных, апробированных методов их обработки, большого массива вычислительных экспериментов, а также независимой верификацией результатов. Основным источником информации о поверхностной динамике служат данные спутниковой альтиметрии AVISO/CMEMS. Для объективной идентификации и отслеживания вихрей применяется современный алгоритм AMEDA, позволяющий не только определять основные геометрические и кинематические характеристики вихрей, но и прослеживать процессы их слияния и разделения. Алгоритм дополняется расчетом обратных во времени траекторий большого числа пассивных частиц.

Существенным достоинством работы является использование независимых источников данных: судовых CTD-наблюдений, данных дрейфующих буев, спутниковых изображений MODIS и реанализа GLORYS12V1. В частности, для Курильской котловины результаты лагранжева анализа сопоставлялись с данными Argo, MODIS и GLORYS12V1, что позволило подтвердить адекватность реконструкции происхождения вод в вихревых ядрах. Большой объем исходных данных, длительность анализируемых временных рядов и использование нескольких независимых методов исследования позволяют считать основные результаты и выводы работы достаточно обоснованными.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 177 страниц, включая 61 рисунок, список литературы содержит 162 наименования.

Первая глава содержит обзор современных представлений о мезомасштабных вихрях и методов их выделения и анализа. Существенное внимание уделено

сопоставлению физических, геометрических, смешанных и лагранжевых методов, а также обоснованию применения алгоритма AMEDA.

Вторая глава посвящена мезомасштабным вихрям Курило-Камчатского желоба. В ней приведены результаты их многолетней переписи, анализа пространственного распределения, кинематических свойств и происхождения вод в вихревых ядрах.

В третьей главе аналогичный комплекс исследований выполнен для Курильской котловины Охотского моря, что позволяет провести содержательное сравнение двух регионов с существенно различающимися динамическими и топографическими условиями.

Четвертая глава посвящена Японскому морю. Помимо многолетней статистики вихревой активности здесь представлены результаты детального лагранжева анализа отдельных вихревых структур и сопоставления расчетов с натурными данными.

Заключение достаточно полно отражает основные результаты проведенного исследования и соответствует поставленным во введении задачам.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертации определяется получением новых количественных характеристик вихревой динамики нескольких ключевых районов северо-западной части Тихого океана, а также развитием методических подходов к оценке происхождения и переноса водных масс вихрями. Предложенная комбинация автоматизированного детектирования вихрей и лагранжева анализа может быть применена не только в рассмотренных районах, но и в других регионах Мирового океана. Автором показано, что полученные базы данных и разработанные методы могут использоваться при совершенствовании океанических моделей, исследовании распространения загрязняющих веществ, планировании экспедиционных исследований и мониторинге вихревой активности.

Личный вклад соискателя и апробация результатов. Личный вклад А.А. Удалова представляется ключевым в представленной работе. Автором выполнялись детектирование и отслеживание вихрей по спутниковым данным, адаптация параметров алгоритма AMEDA, расчет кинематических характеристик, анализ лагранжевых траекторий и разработка методики количественного определения долей вод различного происхождения в вихревых ядрах. Автор принимал непосредственное участие в интерпретации результатов, их верификации и подготовке научных публикаций. Результаты диссертации хорошо опубликованы, по теме работы опубликовано 10 статей в рецензируемых научных журналах, в том числе в ведущих международных журналах Deep Sea Research, Progress in Oceanography, Ocean Dynamics, Physics of Fluids.

Замечания по диссертационной работе. При общей высокой оценке работы необходимо отметить ряд вопросов и замечаний.

1. Одним из центральных результатов диссертации являются количественные оценки долей вод различного происхождения в вихревых ядрах. При этом лагранжевы траектории в значительной степени рассчитываются по поверхностному геострофическому полю, восстановленному по спутниковой альтиметрии. Было бы полезно более подробно представить количественную оценку неопределенности получаемых долей вод и их чувствительности к разрешению исходного поля, параметрам интегрирования траекторий и выбору границ областей происхождения вод.

2. В разных регионах используются различные критерии выделения долгоживущих вихрей. В Курило-Камчатском желобе основное внимание уделяется вихрям с временем жизни более 90 суток, тогда как для Курильской котловины и значительной части анализа Японского моря используется порог 30 суток. Например, для Курило-Камчатского желоба приводятся 219 долгоживущих антициклонов и 468 циклонов при пороге 90 суток, тогда как для Курильской котловины используется порог 30 суток. Представлялось бы целесообразным подробнее обосновать выбор различных порогов и, возможно, провести часть межрегиональных сравнений при едином критерии продолжительности жизни.

3. В числе задач диссертации заявлена оценка роли вихрей в переносе тепла, соли и питательных веществ. Работа убедительно демонстрирует способность вихрей переносить воды определенного происхождения и показывает потенциальное значение такого переноса для термохалинной структуры и биологической продуктивности. Вместе с тем собственно интегральные количественные оценки потоков тепла, соли или биогенных элементов через заданные границы регионов представлены существенно менее подробно, чем статистика вихрей и доли вод в их ядрах. Получение подобных оценок стало бы естественным следующим этапом развития проведенного исследования.

4. Основной используемый метод характеризует прежде всего поверхностное проявление вихрей и происхождение воды в их поверхностных ядрах. Это непосредственно отмечается, например, в выводах для Курильской котловины. При этом в отдельных местах текста выводы о переносе вод и сохранении их в ядрах вихрей формулируются достаточно широко. Желательно более четко разграничивать результаты, относящиеся к поверхностному вихревому ядру, и выводы о трехмерной структуре и полном объеме вихря. Дополнительное систематическое использование трехмерных данных реанализа или массива Argo позволило бы существенно развить этот аспект исследования.

5. В работе используются альтиметрические продукты различного пространственного разрешения. Например, в методической части упоминаются продукты с разрешением 1/4° и 1/8°, тогда как для отдельных региональных расчетов применяются конкретные варианты этих данных. Представлялось бы полезным более явно свести информацию об использованных продуктах в единую таблицу и показать, насколько статистика мелких вихрей чувствительна к разрешению исходных данных. Тем более что в методической части самой диссертации отмечается, что ошибки определения характеристик вихрей алгоритмом AMEDA могут достигать 15–20% для вихрей, размеры которых близки к нескольким шагам сетки.

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы, которая, безусловно, является полноценным и оригинальным научным исследованием. Считаю, что диссертационная работа выполнена на актуальную тему и на высоком научном уровне, представляет научный и практический интерес, полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор А.А. Удалов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник, заместитель директора по научно-организационной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Осадчиев Александр Александрович «19» октября 2026 г.

Контактные данные:
Тел.: +7(916)579-81-28, e-mail: osadchiev@ocean.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.28 – «Океанология»

Адрес места работы:
117997, г. Москва, Нахимовский просп., д. 36,
ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов
Тел.: +7(499)124-61-49, e-mail: office@ocean.ru