# ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Кубрякова Арсения Александровича

на диссертационную работу

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

**Актуальность темы исследования.** Представленная к защите работа Удалова Александра Алексеевича посвящена комплексному исследованию свойств, динамики и роли мезомасштабных вихрей в Японском и Охотском морях и прилегающей части северо-западной акватории Тихого океана. Тема диссертации, безусловно, актуальна, поскольку мезомасштабные вихри играют важнейшую роль в переносе тепла, соли, биогенных элементов и загрязнений, формировании гидрологической структуры морей, перемешивании и продуктивности рыбохозяйственно значимых районов Дальнего Востока. В диссертации соискатель разработал и верифицировал оригинальный метод посуточной количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей на основе совместного применения алгоритма AMEDA и лагранжевого анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров. На основе комплексных математических методов автор впервые получил детальные многолетние данные о пространственном распределении мезомасштабных вихрей и их кинематических характеристиках (время жизни, размеры, скорость переноса и вращения, параметр нелинейности и др.) в районе Курило-Камчатского желоба, Курильской котловины Охотского моря и северной части Японского моря. В частности, показано преимущественно субарктическое происхождение вод в ядрах курильских вихрей, количественное преобладание циклонов над антициклонами в Курильской котловине, устойчивая пространственная сегрегация разнополярных вихрей в северо-восточной части Японского моря, а также способность долгоживущих антициклонов эффективно переносить субтропические воды через Субполярный фронт. Представленная работа вносит существенный вклад в понимание особенностей вихревой динамики в дальневосточных морях России.

Особо следует отметить методологическую новизну и практическую ценность совместного применения автоматизированного алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA с лагранжевым анализом. Такой комплексный подход позволил впервые для рассматриваемых акваторий проследить во времени распределение водных масс различного происхождения в ядрах мезомасштабных вихрей с посуточным разрешением на протяжении всего жизненного цикла вихревых образований,. Этот метод существенно расширяет методологическую базу и фундаментальные основы для исследования влияния вихрей на формирование термохалинной структуры вод.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и списка литературы. Общий объём работы – 177 страниц, включая 61 рисунок. Библиография содержит 162 наименования.

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях.

В Главе 1 систематизированы современные подходы к идентификации мезомасштабных вихрей и методы их анализа. Даны обзоры различных алгоритмов детектирования вихрей, рассмотрены методы построения карт происхождения, длин путей и возраста вод, а также способы верификации результатов с использованием натурных данных и вихреразрешающего реанализа. Обоснован выбор комплекса методов AMEDA и лагранжевого анализа для решения поставленных задач.

В Главе 2 на основе спутниковой альтиметрии за 1993–2021 гг. проведена систематическая перепись мезомасштабных вихрей Курило-Камчатского желоба. Идентифицировано 2520 вихрей, установлены устойчивое преобладание циклонов над антициклонами и пространственная асимметрия распределения долгоживущих вихрей относительно оси желоба. С помощью лагранжевого анализа количественно оценён состав вод различного происхождения в ядрах вихрей и показано, что даже в юго-восточной части желоба доля трансформированных субтропических вод не превышает 6%.

В Главе 3 исследованы мезомасштабные вихри Курильской котловины Охотского моря. Впервые на основе многолетней альтиметрии показано количественное преобладание долгоживущих циклонов над антициклонами.

Установлено, что ядра вихрей обоих знаков на 60–80% состоят из вод открытого океана с выраженным сезонным максимумом в холодный период. Проведено сопоставление свойств вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского желоба.

В Главе 4 представлены результаты многолетней статистики, эволюции и роли мезомасштабных вихрей в водообмене северной части Японского моря. Выявлены зоны повышенной вихревой активности, связанные с топографией и неустойчивостью пограничных течений. В северо-западной части моря детально прослежена эволюция долгоживущего прифронтового антициклона, в ядре которого 60–90% объёма составляли субтропические воды. В северо-восточной части впервые количественно охарактеризована устойчивая пространственная сегрегация антициклонических и циклонических вихрей.

**Научная новизна.** В работе содержится ряд результатов, ранее не получавших систематического количественного описания для дальневосточных акваторий. Существенный методологический вклад составляет разработанный автором подход к совместному использованию алгоритма AMEDA и лагранжевого анализа, позволяющий восстанавливать посуточную эволюцию состава вод в ядрах отдельных вихрей на протяжении всего времени их существования. Такой уровень детализации выходит за рамки традиционного эйлерова описания и открывает возможность сопоставления вихревого переноса в различных частях региона.

На основе многолетней спутниковой альтиметрии (1993-2021/2024 гг.) автор провёл первую для изучаемых районов систематическую перепись долгоживущих мезомасштабных вихрей и сопроводил её анализом кинематических характеристик и лагранжевыми оценками происхождения вод. Для Курило-Камчатского желоба показано, что в ядрах вихрей преобладают субарктические воды: даже в наиболее юго-восточной части доля трансформированных субтропических вод не превышает 6%. Для Курильской котловины Охотского моря, вопреки прежним представлениям, получено количественное подтверждение преобладания циклонов над антициклонами (примерно в 1,5 раза), при этом в ядрах вихрей обоих знаков преобладают воды открытого океана (60-80%) с выраженным сезонным максимумом в холодный период.

В северной части Японского моря показано, что мезомасштабные вихри выполняют различные функции в региональном водообмене. В северо-восточной части впервые количественно зафиксирована устойчивая пространственная

сегрегация антициклонических и циклонических вихрей (индекс Жаккара для наиболее интенсивных очагов составляет 1-3%), что связано с особенностями пограничных течений и рельефа дна. В северо-западной части на примере долгоживущего прифронтового антициклона продемонстрирована способность таких структур длительное время удерживать и переносить субтропические воды через Субполярный фронт в субарктическую зону (до 60-90% в ядре). В совокупности эти результаты представляют собой новый количественный вклад в понимание вихревой динамики северо-западной части Тихого океана.

**Практическая ценность работы.** Полученные сведения о пространственно-временном распределении мезомасштабных вихрей, их кинематических свойствах и составе водных масс в ядрах могут быть использованы при разработке и верификации региональных океанических моделей, в том числе при параметризации вихревых процессов в моделях с недостаточным разрешением мезомасштабной изменчивости. Установленные закономерности вихреобразования и эволюции вихрей имеют прямое отношение к прогнозированию условий в рыбопромысловых районах Дальнего Востока, поскольку вихри и их периферийные зоны способствуют концентрации планктона и кормовых ресурсов. Количественные оценки происхождения вод в вихревых ядрах могут быть полезны при оценке распространения загрязнений и других экологически опасных веществ в изучаемых акваториях. Сформированные в работе карты вихревой активности и базы данных о долгоживущих вихрях могут служить основой для планирования натурных экспедиций и оперативного мониторинга вихревой динамики в регионе.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.** Обоснованность и достоверность результатов подтверждается согласованием с натурными данными, независимыми полями реанализа GLORYS12V1 и спутниковыми данными MODIS, а также применением широко апробированных в мировой практике методов. Показателем достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в рецензируемых журналах с высоким рейтингом и представление на конференциях высокого уровня и высокие оценки в перечнях важнейших научных достижений ТОИ ДВО РАН.

**Замечания по работе:**

Вместе с тем в работе присутствуют недостатки, связанные с некоторыми выводами и широко поставленными задачами, которые недостаточно детально

обсуждаются в тексте работы. Механизмы образования и распада вихрей, роль вихрей в переносе тепла, соли и питательных веществ, а также связь вихревой активности с биологической продуктивностью и рыбопромысловыми районами описаны преимущественно качественно и требуют дальнейшей количественной проработки. Ниже привожу конкретные замечания по тексту диссертации Удалова А.А,

1. Глава 1 в значительной мере носит обзорный характер и занимает существенную часть диссертации. Её содержание в целом хорошо структурировано и логично подводит к региональным исследованиям, однако часть обзора сосредоточена преимущественно на собственных работах. Например, в разделе 1.4 «Применения комплексного метода анализа вихрей в различных регионах Мирового океана» (с. 61–62) нет основополагающих работ по исследованию статистики и кинематики мезомасштабных вихрей, основанных на методах их идентификации, в том числе работ Д. Челтона с соавторами и других пионерских исследований. В разделе, посвящённом применениям метода в Мировом океане, этот общий контекст было бы целесообразно добавить.
2. Разделение методов идентификации на физические и геометрические (с. 29) не совсем корректно. Замкнутые изолинии уровня моря и функции тока тоже относятся к физике вихря: в геострофическом поле это линии тока, и они выражают вращение. В п. 1.2.1 вихрь определяется в том числе замкнутыми изолиниями завихренности (с. 31), а в п. 1.2.2 тот же признак отнесён к геометрическим методам (с. 32–34). Представляется полезным в начале п. 1.2 пояснить, что такое деление условно и что изолинии остаются физическим признаком.
3. В Главе 3 для Курильской котловины Охотского моря количественно установлено преобладание циклонов. Выявленные преобладание циклонов над антициклонами и асимметрия их пространственного распределения отмечались в различных районах Мирового океана во множестве предыдущих работ. Эти особенности, в частности, могут быть связаны с механизмом генерации малых циклонов (часто нескольких) из-за интенсивного сдвига скорости на периферии одного крупного антициклонического вихря. Подробно этот вопрос рассмотрен, например, в исследованиях А. Г. Зацепина для акватории Чёрного моря и в ряде теоретических работ (Callies et al., 2015; McWilliams, 2016; Brannigan et al., 2017).

Представляется, что обсуждение и анализ влияния такого механизма позволили бы дополнить полученные результаты.

4. В работе и в выводах автор часто упоминает механизмы генерации вихрей как полученный результат. В частности, для Японского моря: «На внешней (глубоководной) стороне таких течений, как Приморское течение, происходит растяжение водных столбов. Для сохранения потенциальной завихренности это требует увеличения положительной относительной завихренности, что приводит к регулярному срыву циклонических вихрей» (с. 123). В выводах главы формулируется более конкретно: «В субтропической зоне доминирует бароклинная и баротропная неустойчивость ветвей Цусимского течения, усиленная влиянием подводной топографии. В субарктической зоне ключевую роль играют два механизма: топографическая генерация антициклонов над подводными горами (гайоты Габбас и Кольцо) за счет сохранения потенциальной завихренности, а также неустойчивость пограничных течений (Приморское течение), приводящая к генерации циклонов на внешней стороне течения и антициклонов на внутренней» (с. 152). Безусловно, определение механизмов генерации вихрей является важнейшей фундаментальной физической задачей. Однако эти механизмы в работе обсуждены прежде всего качественно и требуют более детальной проработки. Для этих целей было бы полезно провести анализ бароклинной и баротропной неустойчивости соответствующих течений, специальные численные эксперименты, детальное исследование эволюции отдельных вихрей. В данной работе акцент больше направлен на получение статистических характеристик вихрей с помощью продвинутых математических методов и в меньшей степени — на исследование причин их образования. Поэтому заключения о механизмах скорее следует рассматривать как гипотезы, требующие дальнейшего обоснования, или как предмет дискуссии, а не как установленные результаты.

5. В постановке задач работы отдельно выделена оценка роли мезомасштабных вихрей в переносе тепла, соли и питательных веществ. Однако, этот вопрос рассмотрен недостаточно подробно. Представляется целесообразным усилить в дальнейших работах количественную оценку интегрального вклада вихрей в горизонтальный и вертикальный перенос тепла соли и биогенных элементов, по крайней мере для наиболее интенсивных и долгоживущих вихревых образований рассматриваемых регионов.

6. Разработанный метод оценки состава вод в вихрях относится преимущественно к поверхностному слою, поскольку исходными данными служат поля спутниковой альтиметрии и геострофические скорости, не охватывающие вертикальную структуру вихрей. Автор корректно указывает на эту особенность, однако для полного понимания роли вихрей в водообмене в дальнейшем было бы целесообразно учесть трехмерный перенос и вертикальную структуру водных масс, например, с использованием данных численных моделей. Также достаточно важным вопросом является выделение начального расположения границ водных масс, а также сопоставление полученных лагранжевых оценок с вертикальной TS структурой в вихрях на конец расчета, что позволит подтвердить полученные результаты.

7. В выводах к главе 2 указано: «Подтверждена ключевая роль вихрей ККЖ в перераспределении биогенных элементов в северо-западной части Тихого океана» (с. 82). Связь вихревой активности с биологической продуктивностью и рыбопромысловыми районами обозначена качественно, но не показано прямое сопоставление зон повышенной вихревой активности с известными промысловыми районами, сезонными максимумами биомассы или полями хлорофилла, поэтому эти выводы, скорее относятся к дискуссии. В дальнейшем развитии темы было бы полезно более прямо связать выявленные закономерности вихреобразования и состава вод в ядрах вихрей с конкретными продуктивными зонами и сезонной динамикой биогенного транспорта.

**Общая оценка работы.** Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы, а скорее обозначают направления дальнейшего развития. Диссертация выполнена на высоком уровне, опирается на современные методы и обширные массивы спутниковых данных; в ней получен ряд новых результатов, крайне актуальных для исследования вихревой динамики дальневосточного региона. Язык изложения чёток и ясен, а автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и многих международных и всероссийских конференциях. Результаты диссертации опубликованы в 10 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК и относящихся к высшей категории К1 (согласно списку Рабочей группы ВАК по

категорированию научных изданий от 06.12.2022 № 02–1198). Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация отвечает всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор **Александр Алексеевич Удалов** безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.6.17. - «океанология».**

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,

Заместитель директора
по научной работе
Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательского центр Морской гидрофизический Институт Российской академии наук»
(МГИ РАН).

д.ф.- м.н. Кубряков Арсений Александрович
E-mail: arskubr@ya.ru
Тел. .:+79787411045
299007, г. Севастополь, ул. Ген. Острякова, д.5-а, кв. 58.

Подпись заместителя директора по научной работе доктора физико-математических наук, А.А. Кубрякова удостоверяю:

Ученый секретарь МГИ РАН
к.ф.-м.н. Д.В. Алексеев

Дата: 21.10.2025