

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Егоровой Виктории Михайловны
на тему: «Вихревая динамика над неосесимметричной топографией дна
во вращающейся стратифицированной жидкости (в приложении к
Кипрскому вихрю)»
по специальности 1.6.17 – Океанология

Диссертационная работа В.М. Егоровой посвящена исследованию влияния неосесимметричной топографии дна на вихреобразование и эволюцию вихрей во вращающейся стратифицированной жидкости применительно к «Кипрскому» вихрю в Средиземном море. Исследование проводилось с использованием различных методов – аналитических и численных, а также лабораторного моделирования.

Тема работы является весьма **актуальной**. Известно, что Кипрский вихрь, один из перманентно существующих средиземноморских мезомасштабных вихрей, значительным образом влияет не только на динамику, но и на функционирование экосистемы юго-восточной части Средиземного моря (Левантийского бассейна), а также на распространение загрязнений и формирование неоднородностей в их распределении. Однако механизм образования этого вихря, особенности его изменчивости под влиянием различных внешних факторов (крупномасштабного течения, плотностной стратификации и других) до сих пор являются недостаточно исследованными. Данная диссертационная работа вносит весомый вклад в понимание основного физического механизма формирования Кипрского вихря (а именно, топографического механизма), а также в описание его структуры и ее трансформации под влиянием внешних воздействий. Кроме того, в ней убедительно показано, что Кипрский вихрь, по сути, является дипольной вихревой структурой (циклон-антициклон) с доминированием

антициклонической части этой структуры и его следует называть «Кипрской вихревой структурой», что и делается в диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения, а также большого списка цитируемых литературных источников, что свидетельствует о высокой эрудиции соискателя в поставленной проблеме. В **первой главе** работы представлено аналитическое, а во **второй главе** - численное решение методом контурной динамики задачи влияния неосесимметричного рельефа дна на течения с различной кинематической структурой и разного направления для случаев однородной и стратифицированной вращающейся жидкости. В **третьей главе** приводится описание лабораторных опытов по исследованию влияния неосесимметричной донной топографии на затухающее течение, а также выполнен сравнительный анализ результатов работы с данными наблюдений.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Выдвинута и успешно подтверждена на основе аналитических и, главным образом, численных расчетов гипотеза формирования Кипрской вихревой системы из-за влияния неосесимметричной топографии дна на набегающее течение.
2. Показано, что влияние плотностной стратификации вод Левантийского бассейна обеспечивает заметное уменьшение скорости течения в придонных слоях воды по сравнению с приповерхностными. Этот фактор способствует формированию Кипрской вихревой системы, которая не могла бы образоваться при больших значениях скорости набегающего потока, характеризующих однородную по плотности водную среду. Кроме того, стратификация определяет вертикальную структуру вихрей, которые сужаются к поверхности моря, представляя собой наклонные усеченные конусы Тейлора-Хогга.
3. Показано, что направление фонового течения над неоднородной донной топографией, играет важную роль в формировании дипольной Кипрской вихревой системы. При этом восточное и северо-восточное

направления течения ослабляют циклонический вихрь, а юго-восточное – усиливает его. Антициклонический Кипрский вихрь обладает более высокой резистентностью по отношению к направлению течения.

4. Установлено, что наблюдаемые на спутниковых изображениях поверхности моря термические аномалии над Кипрской вихревой системой образованы вертикальными движениями, обусловленными ненулевой спиральностью вихревого течения. При этом «теплая» аномалия над антициклоном формируется даунвеллингом, утолщающим слой теплой воды в его области, а «холодная» пятно над циклоном – апвеллингом, поднимающим более холодные воды к поверхности.

Отмеченные выше и многие другие результаты работы соискателя обладают **оригинальностью**, научной **значимостью и новизной**, а также **практическим значением**. При этом главным результатом, по мнению оппонента, является то, что впервые **четко определена и обоснована** физическая причина образования Кипрской квазидипольной вихревой системы и исследованы особенности ее изменчивости под влиянием внешних условий. **Положения**, выносимые на защиту, **достаточно продуманы и обоснованы**.

Достоверность полученных результатов основана на корректном использовании фундаментальных законов гидродинамики вращающейся стратифицированной жидкости, а также на применении (при аналитическом исследовании и численном моделировании) значений параметров, рассчитанных по данным натурных измерений. Для верификации аналитических и численных моделей использовались результаты лабораторных опытов, а также результаты моделирования воздействия неоднородной топографии на динамику вращающейся стратифицированной жидкости, полученные другими авторами.

Не вызывает сомнения определяющий характер личного вклада соискателя в диссертационное исследование. При этом В.М. Егоровой разработан алгоритм решения гидродинамических задач при наличии

неосесимметричной топографии дна (ранее такой алгоритм существовал только для случая осесимметричных топографических неоднородностей). Ею выполнены серии численных экспериментов с использованием метода контурной динамики по изучению Кипрской вихревой системы при различной кинематической структуре и направлении фонового течения, при наличии свободных вихрей в потоке, проведены тестовые лабораторные опыты, обработаны и проанализированы массивы натуральных данных STD-зондирований, а также спутниковых изображений поверхности моря (аномалии уровня моря и температуры).

Работа не лишена некоторых **недостатков**.

1. В главе 1 аналитическим образом решается задача формирования Кипрской вихревой системы над неосесимметричной топографией при наличии β -эффекта. Однако в Главе 2 та же задача решается численным образом методом контурной динамики, но в отсутствие бета-эффекта (на f -плоскости). Означает ли это, что учет β -эффекта не имеет принципиального значения? Этот вопрос практически не обсуждается. Вместе с тем, аналитическое решение с учетом β -эффекта показывает наличие волно-вихревого следа за топографической неоднородностью в восточно-направленном течении. На взгляд оппонента это существенный результат, свидетельствующий о важности учета β -эффекта в задаче о Кипрской вихревой системе. Данный вопрос следовало бы обсудить более обстоятельно.

2. В главе 2, являющейся центральным разделом диссертации, численная реализация метода контурной динамики (МКД) производится в приближении трехслойной жидкости. При этом структура плотностной стратификации свидетельствует о наличии квазинепрерывного по вертикали градиента плотности, величина которого в верхнем 75-м слое в несколько раз превышает его величину в слое 100-700 м над горой Эратосфена. Возможно, что для выявления основных особенностей вихреобразования было бы достаточно использовать модель двуслойной жидкости. Однако не

исключено, что более точное воспроизведение плотностной стратификации (четырёх-пятислойная модель) оказывает существенное влияние на результаты численного эксперимента. Следовало бы убедительно обосновать выбор трехслойной модели.

3. Одним из важных результатов численных МКД-расчетов является выявление правила, согласно которому вихревая система не может образовываться над неоднородностью рельефа, если скорость набегающего течения U превышает критическое значение U_{cr} (для Кипрского антициклона $U_{cr} \geq 0.037$ м/с). Однако, такого рода правило имеет весьма ограниченное применение, поскольку приводится в виде размерного критерия. Более предпочтительной является формулировка правила в виде безразмерного критерия, которым в данном случае является значение числа Кибеля-Россби – U/Lf , где L – горизонтальный размер препятствия, а f – параметр Кориолиса. Очевидно, что это правило должно иметь общий характер и его можно применять к условиям обтекания других мезомасштабных препятствий на дне океана, что представляет несомненный интерес.

4. В работе исследуется важный аспект взаимодействия свободных (т.е., топографически непривязанных) вихрей с топографическими вихрями. При этом они почему-то называются «пятнами». Представляется, что такой «жаргонизм» не является удачным.

5. Много претензий можно выдвинуть в отношении лабораторного моделирования. Главная из них заключается в том, что течение в жидкости, изначально раскрученной вместе с бассейном до состояния квазитвердотельного вращения, создавалось методом внезапной остановки вращающегося стола. При этом формально нельзя использовать уравнения гидродинамики справедливые для вращающейся системы координат, в которые входит сила Кориолиса. Вместе с тем, медленно затухающая из-за трения циркуляция жидкости в сосуде демонстрирует эффекты обтекания препятствия, характерные для вращающейся жидкости и, в частности, образование топографически привязанных вихревых колонок, при

небольших значениях числа Кибеля-Россби, построенного с использованием значения параметра Кориолиса, характерного для начального состояния системы до момента остановки вращающегося стола. Но эксперимент был бы поставлен более корректно, если бы течение создавалось не остановкой стола, а изменением угловой скорости его вращения в пределах 10-20%.

Сделанные замечания не умаляют высокой научной значимости диссертационного исследования. Диссертация Егоровой В.М. отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.17 – Океанология (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель – Егорова Виктория Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории экспериментальной физики океана
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Зацепин Андрей Георгиевич

26 марта 2024г.

Контактные данные:

тел.: 7(963)6715104, e-mail: zatsepin@ocean.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 11.00.08 – Океанология

Адрес места работы:

117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Лаборатория экспериментальной физики океана

Тел.: 7(963)6715104 (моб.), 7(499)1246392, e-mail: zatsepin@ocean.ru

Подпись сотрудника ИО РАН Зацепина А.Г.

удостоверяю:

кадровый работник

дата:

