

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Егорова Виктория Михайловна

**Вихревая динамика над неосесимметричной топографией дна во
вращающейся стратифицированной жидкости (в приложении к
Кипрскому вихрю)**

1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт водных проблем Российской академии наук»

Научный руководитель

Соколовский Михаил Абрамович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты

Зацепин Андрей Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГБУН «Институт океанологии им.
П.П. Ширшова РАН», главный научный
сотрудник Лаборатории экспериментальной
физики океана

Ингель Лев Ханаанович,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГБУ НПО «Тайфун»
(Росгидромет), ведущий научный сотрудник
Института экспериментальной
метеорологии

Белоненко Татьяна Васильевна,
доктор географических наук,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
Государственный университет», профессор
кафедры океанологии

Защита диссертации состоится «18» апреля 2024 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3(01.15) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, физический факультет _____ .

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2910>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



С.В. Колесов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования диссертационной работы являются мезомасштабные вихри, формирующиеся в океанских потоках в окрестности локализованных особенностей дна — топографические вихри.

Предметом приложения различных методов **исследования** выбран Кипрский вихрь и циклон, расположенные южнее острова Кипр в Средиземном море над неосесимметричной неоднородностью рельефа дна, представленной в виде горы Эратосфена, возвышающейся внутри юго-восточной периферии глубокой впадины.

Локальный рельеф, включающий в себя гору Эратосфена и близлежащую впадину, далее будем называть структурой «впадина-гора», а топографическую квазидипольную вихревую структуру, состоящую из Кипрского вихря и соседнего циклона, — *Кипрской вихревой системой*.

В работе выдвинута гипотеза, что, так называемая *Кипрская вихревая система* (в частности, сам Кипрский вихрь), имеет «топографическую природу». Данная гипотеза проверяется и обосновывается на основе использования различных **методов исследования** (лабораторный эксперимент, аналитическое и численное решение задачи топографического вихреобразования, базирующееся на законе сохранения потенциального вихря в приближении безграничного океана с условием безотрывного скольжения на дне в рамках моделей однородного (Козлов 1983б), стратифицированного (Зырянов, 1985) и трехслойного (Соколовский 1991) океанов. В этом заключается основная тема диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. В начале 1920-х годов Джеффри Тейлор проводил эксперименты с перемещением небольшого возмущения (в виде кругового цилиндра) по дну вращающегося резервуара, заполненного однородной жидкостью (Taylor 1923). Он обнаружил, что над подвижным возмущением формируется цилиндрический антициклонический вихрь.

Топографические вихри в океане над подводными горами были открыты в 70-х годах прошлого века (Понтекорво 1974; Huppert and Bryan 1976). Это стало важным этапом в развитии теории океанских вихревых структур.

Топографическим называют вихрь, сформированный за счет воздействия на океанское течение мезомасштабных неоднородностей рельефа дна, таких как подводные горы, хребты, впадины, подводные вулканы и т. д. (Козлов 1983а; Зырянов 1985). В приближении однородного океана топографические вихри имеют форму вертикальных цилиндров (вихри Тейлора), в стратифицированном океане они имеют тенденцию к сужению снизу вверх (Hogg 1973), представляя собой так называемые усеченные конусы Тейлора-Хогга (Зырянов 1995).

Общая циркуляция восточной части Средиземного моря, по натурным данным, представляет собой совокупность сильно меандрирующих течений и нескольких крупномасштабных вихрей (Овчинников и др. 1976; Pinardi et al. 2006;

Menna et al. 2021). К югу от острова Кипр располагается квазистационарный теплый Кипрский вихрь.

Он представляет собой локализованный в верхних 700 метрах антициклонический вихрь с азимутальными скоростями, достигающими 30-45 см/с (Hecht et al. 1998; Zodiatis et al. 2005; Hayes et al. 2014). Его средний радиус находится в пределах 40-50 км (Hayes et al., 2019). Положение центра Кипрского вихря подвержено сезонным колебаниям, но в среднем имеет координаты 33.5°N, 33°E (Zodiatis et al. 2005). Спутниковые данные о значениях температуры поверхности моря подтверждают теплую природу Кипрского вихря (Hayes 2016).

Вдоль северной периферии Кипрского вихря фиксируется восточное струйное течение MMJ (Mid-Mediterranean Jet) (Golnaraghi and Robinson 1994; Zodiatis et al. 2023). Кипрский вихрь иногда изображается вместе с циклоном меньшего масштаба у своих западных (северо-западных) границ (Brenner 1989; Zodiatis et al. 2015; Mauri et al. 2019).

Актуальность темы исследования. Несмотря на многочисленные исследования (Brenner 1993; Özsoy, 1993; Zodiatis et al. 2023), механизмы генерации Кипрского вихря все еще не до конца определены. В данной работе сосуществование антициклонического Кипрского вихря с циклоном меньшего масштаба трактуется как топографическая квазидипольная вихревая структура, состоящая из антициклонического вихря над горой Эратосфена и циклонического вихря в потоке над крупной впадиной.

Гора Эратосфена расположена примерно в 100 км к югу от острова Кипр, вблизи 33° меридиана, и имеет длину около 120 км и ширину 80 км. Ее вершина расположена на глубине около 700 м от поверхности моря, а подножие — во впадине на глубине около 2700 м. Центр горы смещен к юго-востоку относительно центра впадины (Kokinou and Panagiotakis 2018).

Аналитическая теория топографических вихрей достаточно хорошо развита для осесимметричных неоднородностей топографии. Изучение особенностей формирования *Кипрской вихревой системы* над структурой «впадина-гора» показало, что требуется обобщение теории на несимметричные случаи.

В диссертации приводится профиль вертикальной скорости над структурой «впадина-гора», исследование температурных аномалий вод вблизи *Кипрской вихревой системы* и анализ спиральности топографического вихря. Наличие вертикальных движений над донными неоднородностями может объяснить хорошо наблюдаемые перемешанные вертикальные столбы жидкости над подводными горами (Зырянов и Егорова 2022).

Изучение Кипрского вихря в рамках теории топографических вихрей (в частности, используя *метод контурной динамики* (МКД)) **актуально** в связи с отсутствием аналогичных работ применительно к данному динамически активному региону.

Цель исследования динамики *Кипрской вихревой системы* в водах Левантийского бассейна — дать объяснение возникновению системы двух

связанных друг с другом вихрей — антициклонического Кипрского вихря и циклона, расположенных южнее острова Кипр.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Получить аналитическое решение задачи о Кипрском вихре, обусловленном воздействием топографии дна, в рамках приближения β -плоскости для однородного океана и с простейшей непрерывной стратификацией (представленной в виде гиперболической параметризации профиля частоты плавучести $N(z)$, предложенной Козловым (1968), Мониным и др. (1970)). Исследовать явление формирования Кипрского вихря.
2. Численно (с помощью МКД) решить задачу о Кипрском вихре в приближении f -плоскости вначале для однородного океана, а потом в рамках квазигеострофической трехслойной модели океана. Провести сравнительный анализ полученных решений.
3. Сравнивая линии тока горизонтального движения в каждом слое трехслойного океана, определить роль стратификации вод океана в процессе формирования топографических вихрей. Исследовать вертикальную структуру вихрей и получить оценки горизонтальных масштабов вихревых пятен в каждом слое.
4. Выявить причины доминирования антициклонического Кипрского вихря над сопутствующим циклоном под воздействием несесимметричного рельефа «впадина-гора», инициирующего формирование дипольной антициклон-циклонической структуры для *Кипрской вихревой системы*. С этой целью провести численные эксперименты с различными вариантами форм фонового потока: (а) набегающего на рельеф под разными углами, (б) имеющего горизонтальный меридиональный сдвиг, (в) содержащего свободные вихри или пятна пассивной примеси.
5. Получить фото- и видеоматериалы генерации вихрей по результатам лабораторных экспериментов во вращающемся резервуаре с жидкостью над различной топографией.

Научная новизна и значимость работы. Дается *первое* теоретическое обоснование природы формирования и сосуществования антициклонического Кипрского вихря и циклона меньшего масштаба как топографической квазидипольной вихревой структуры. Обоснование основывается на применении теории топографических вихрей, адаптированной для решения задач с несесимметричной формой неоднородности рельефа дна, что представляет **теоретическую значимость**.

Под свободными вихрями, взаимодействующими с *Кипрской вихревой системой*, понимаются различные типы свободных океанских вихрей, захваченных фоновым течением. В качестве примера мы рассматриваем антициклонические вихри у берегов Египта (например, Египетский вихрь), отдельные вихри круговорота Родоса или ринги, отделившиеся от меандрирующего течения ММЖ.

Помимо этого, под свободными вихрями можно понимать их частный случай — пятна примеси (например, нефтяные слики), знание о характере эволюции которых представляет **практическую значимость**.

Положения, выносимые на защиту.

1. Подтверждение гипотезы о формировании *Кипрской вихревой системы* под влиянием неосесимметричной топографии дна на набегающее течение.
2. Плотностная стратификация вод Левантийского бассейна обеспечивает формирование *Кипрской вихревой системы* при больших значениях скорости набегающего потока по сравнению с однородной по плотности водной средой.
Стратификация также ответственна за вертикальную структуру вихрей: они сужаются к поверхности океана, представляя собой наклонные усеченные конусы Тейлора-Хогга.
3. Направление фонового потока, набегающего на неоднородность донной топографии, играет важную роль в формировании *Кипрской вихревой системы*, а именно: при его восточном и северо-восточном направлениях циклонический вихрь ослабляется вплоть до полного вырождения.
Антициклонический Кипрский вихрь обладает высокой устойчивостью.
4. «Теплая» поверхностная аномалия над Кипрским вихрем образована даунвеллингом, «холодные» пятна рядом с ним — апвеллингами, обусловленными трехмерной вихревой динамикой.

Степень достоверности результатов. Исследования базируются на фундаментальных законах гидродинамики с использованием при аналитическом исследовании и численном моделировании натуральных и экспериментальных данных об океанографических параметрах Левантийского бассейна и его батиметрии. Для уточнения и верификации моделей используются данные лабораторных экспериментов, а также результаты моделирования воздействия неоднородной топографии на динамику вращающейся стратифицированной жидкости, полученные другими авторами.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации представлены на **восьми** российских и международных конференциях: XVIII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2023) (Москва, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция «3D технологии в решении научно-практических задач» (онлайн, 2023, диплом I степени); 9-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2022); 6-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (онлайн, 2020); Конкурс научных студенческих работ имени академика Р.В. Хохлова, Физический факультет МГУ (онлайн, 2020, диплом III степени); Всероссийская научная конференция с

международным участием «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 2019); 4-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2018); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018», МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2018).

Материалы диссертации обсуждались на научных заседаниях: семинара лаборатории гидродинамики ИВП РАН – 25 октября 2023; совета молодых ученых ИВП РАН – 14 февраля 2024; Ученого совета физического направления ИО РАН им. П.П. Ширшова – 03 ноября 2023 и 9 февраля 2024; секции Ученого совета ИВП РАН "Гидрология суши, водные ресурсы, управление" - 20 февраля 2024; семинара ОГФ Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова – 21 февраля 2024».

По теме диссертации опубликованы **3** работы в изданиях, входящих в международные базы цитирований Web of Science, Scopus и RSCI, в том числе, 2 статьи в международном научном журнале *Ocean Dynamics* (Q2); **6** статей в сборниках материалов конференций, издания которых входят в РИНЦ.

Личный вклад. Автор диссертации разрабатывала и писала программу аналитического решения задачи о Кипрском вихре (разработан алгоритм решения гидродинамических задач с неосесимметричной топографией дна), проводила серии численных МКД-экспериментов по изучению *Кипрской вихревой системы*, обрабатывала массивы натуральных данных для учета стратификации Левантийского бассейна в исследовании, участвовала в подготовительной работе и в последующем проведении лабораторных экспериментов. Автор лично проводила анализ литературных данных, активно участвовала в постановке цели и задач исследования, строила модели, обрабатывала и анализировала результаты, проводила сравнения и формулировала выводы. Автор активно участвовала в подготовке публикаций, а также докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, списка сокращений и условных обозначений, благодарностей и списка цитируемых литературных источников.

В диссертационной работе представлено аналитическое (**Глава 1**) и численное (**Глава 2**) решения задачи набегания потока с различной кинематической структурой и переменного направления на неосесимметричный рельеф дна для случаев однородного и стратифицированного океанов, распределение вертикальной скорости и спиральности движения над топографией (**Глава 1**), а также сравнительный анализ результатов проведенных расчетов с данными наблюдений (**Глава 3**).

Представлены результаты серии численных МКД-экспериментов по взаимодействию *Кипрской вихревой системы* со свободными вихрями разных форм, размеров и завихренностей. В экспериментах такие вихри набегали вместе с фоновым потоком на структуру «впадина-гора». Получены множественные результаты, наиболее интересные из них представлены в работе (**Глава 2**).

В работе также представлены наглядные результаты лабораторных экспериментов по формированию топографических вихрей над неоднородностью во вращающемся резервуаре с жидкостью (**Глава 3**).

Работа изложена на 101 странице, иллюстрирована 38 рисунками и содержит 2 таблицы. Список цитируемых литературных источников включает в себя 172 наименований, из которых 22 на русском языке.

Благодарности. Выражаю благодарность своему научному руководителю и наставнику, *Соколовскому Михаилу Абрамовичу*, за постоянную поддержку и содействие в написании диссертационной работы, за терпение и отзывчивость. Не могу не поблагодарить своего коллегу из Кипрского университета, *Джорджа Зодиатиса (George Zodiatis)*, за предоставленные научные данные, за конструктивные замечания и рекомендации. Выражаю признательность коллеге из Института ядерных исследований РАН, *Петрову Павлу Константиновичу*, за интересные идеи. Благодарю научно-педагогический состав аспирантуры *Института водных проблем РАН* за помощь в приобретении научного опыта. Хочу сказать *большое* спасибо моей семье и моим друзьям.

Отдельная благодарность моему первому научному руководителю, *Зырянову Валерию Николаевичу*, за его большой вклад в мое развитие и научные достижения. Светлая ему память!

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены сведения о степени разработанности темы исследования, объекте и предмете, а также методах исследования, обозначены научная новизна и значимость, приведены сведения об апробации работы, личном вкладе соискателя, о структуре и объеме диссертации.

Глава 1 (построенная на результатах статьи *Egorova et al. 2022*, и статьях *Зырянов, Егорова 2019; 2020*) содержит краткий обзор аналитической теории топографических вихрей (в приближениях однородного и стратифицированного океанов), базирующейся на законе сохранения потенциального вихря.

На Рисунке 1 представлены аналитические решения (в терминах вертикальных распределений функции тока в отдельных горизонтальных сечениях) задачи о формировании *Кипрской вихревой системы на β -плоскости* над структурой «впадина-гора», аппроксимируемой параболоидами вращения. На крайних сечениях прослеживается изменчивость вихрей с глубиной (панель А — на глубине 20 метров, панель Б — на глубине 920 метров).

Пространственное распределение вихрей демонстрирует, что чем ближе циклон или антициклон к топографической неоднородности (ко дну), тем больший линейный масштаб они имеют. Это свидетельствует о тенденции вихрей к принятию конусовидной формы, т.е. к превращению топографических вихрей в усеченные конусы Тейлора-Хогга (Рисунок 2).

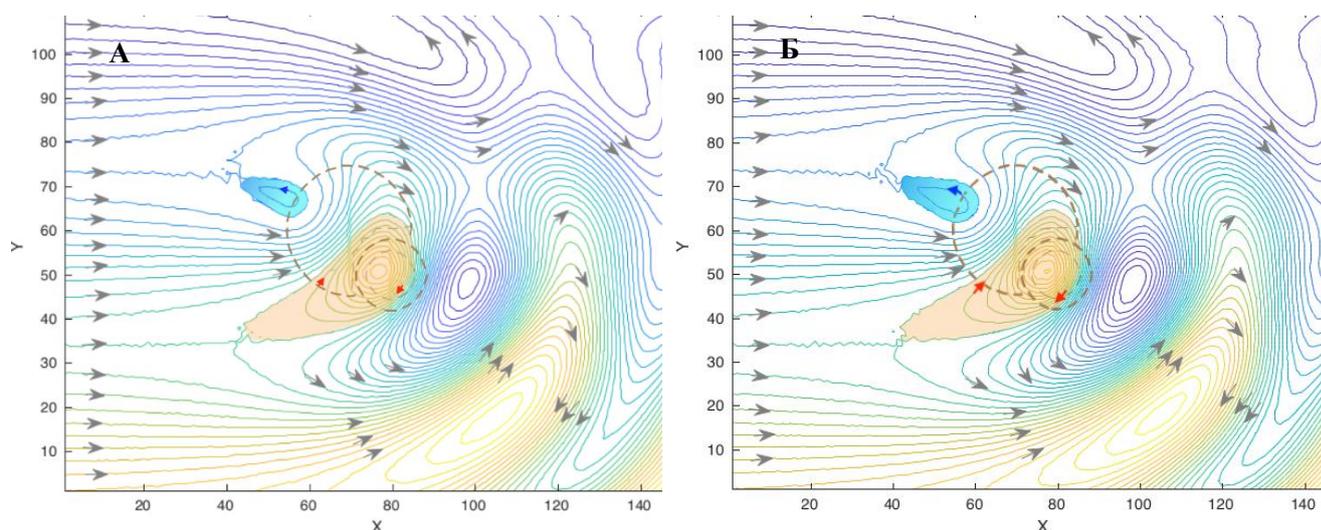


Рисунок 1. Линии тока суммарного поля возмущения в стратифицированном океане. Панель А: на глубине $z = 0$ (20 м), панель Б: на глубине $z = 0.6$ (920 м), соответственно. Серыми стрелками указано направление внешнего течения $u = 0.8$ штрихом отмечена структура «впадина-гора», внутренние части петель сепаратрис мы ассоциируем с захваченными вихрями: Кипрский вихрь – рыжая область, циклон – синяя область, за вихрями вниз по потоку – волна Россби

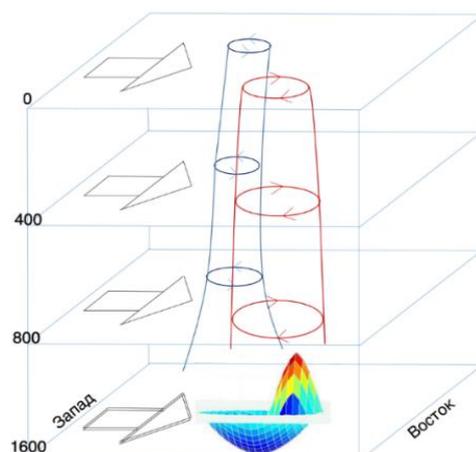


Рисунок 2. Схематическое представление пространственной вихревой структуры восточного стратифицированного течения над структурой «впадина-гора»

Анализ координат центров вихрей и горы Эратосфена показал тенденцию к формированию антициклона над южной областью подводной возвышенности, а также возможность сильного наклона вихревой оси.

По оценке направления ротора скорости ($\text{rot}\vec{U}$) внутри Кипрского вихря можно положить, что если жидкость в вихре опускается (даунвеллинг), то спиральность \mathcal{H} положительна ($\mathcal{H} = \vec{U} \cdot \text{rot}\vec{U}$). Напротив, если наблюдается апвеллинг, то спиральность \mathcal{H} отрицательна. (Ось OZ направлена вниз).

На Рисунке 3 представлен результат вычислений параметра спиральности на разных глубинах над структурой «впадина-гора». Над южным краем горы Эратосфена преобладают положительные значения спиральности. В северо-восточной и северо-западной областях горы — отрицательные. Это свидетельствует об опускании (поднятии) вод у южных (северных) границ топографической системы.

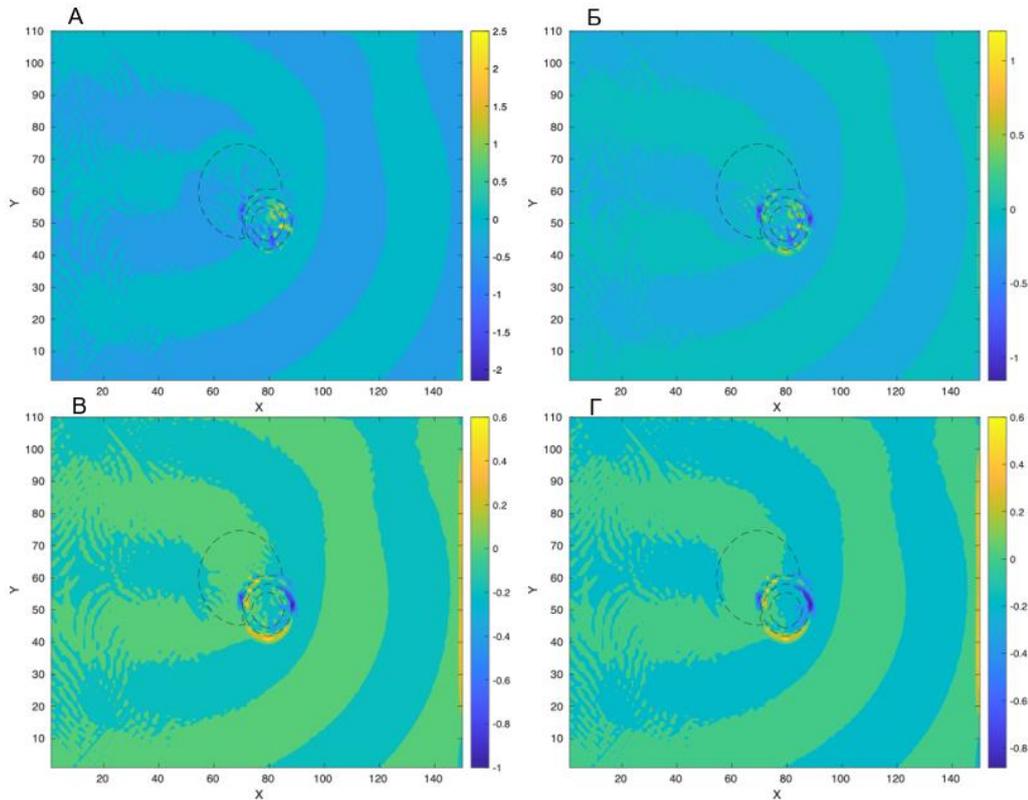


Рисунок 3. Спиральность \mathcal{H} на разных глубинах А: $z = 0.6$ (920 м), Б: $z = 0.4$ (620 м), В: $z = 0.2$ (320 м), Г: $z = 0$ (20 м), структура «впадина-гора» отмечена штриховыми линиями

Картина вертикальных движений жидкости в непрерывно стратифицированном океане представлена на Рисунке 4 (Панель А). Здесь вертикальные скорости w достигают 2.5 мм/с. Наблюдаются области апвеллинга — поднятия холодных вод в северо-восточной части горы Эратосфена и даунвеллинга — опускания прогретых поверхностных вод на юго-западе горы. Температурный анализ проведен с учетом областей даунвеллинга и апвеллинга. Сравнение значений спиральности \mathcal{H} и направлений вертикальных движений показало хорошее соответствие с данными спутниковых наблюдений (Панель Б) и с натурными и численными данными (Zodiatis et al. 2015).

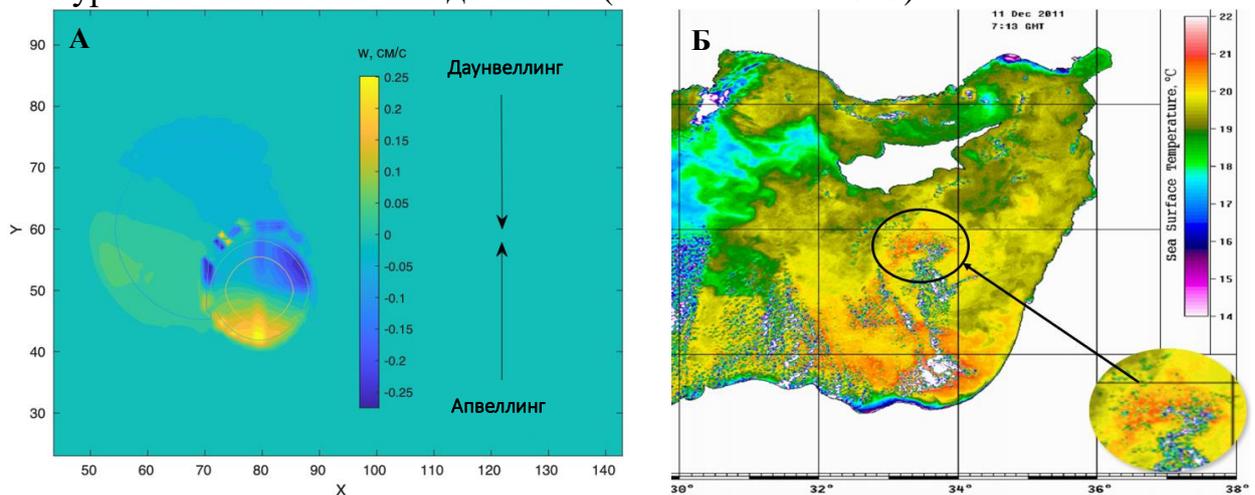


Рисунок 4. Панель А: Вертикальные скорости непрерывно стратифицированной жидкости над структурой «впадина-гора» (нанесена отдельно сплошными линиями). Панель Б: Температура поверхности моря южнее острова Кипр, данные со спутника (Hayes 2016)

Глава 2 (построенная на результатах статей Egorova et al. 2022; Egorova et al. 2023 и в тезисах докладов Egorova и др. 2022-2023) содержит описание МКД.

Отметим, что МКД, основанный на лагранжевом подходе, дает возможность изучать сколь угодно мелкие структурные изменения контуров вихревых пятен (Zabusky et al. 1979; Kozlov 1983; Dritschel 1988), недоступные при использовании сеточных численных методов. В используемой нами трехслойной версии МКД (Соколовский 1991) предусмотрена так называемая процедура *контурной хирургии* (Макаров 1991). Она позволяет производить отсечение длинных и тонких динамически незначимых вихревых нитей, а также удалять покрывающие друг друга участки границ при сближении вихревых пятен с одинаковыми значениями потенциальной завихренности.

В первых решениях задачи о Кипрском вихре с помощью МКД в качестве донной неоднородности бралась неосесимметричная структура «впадина-гора», составленная из двух смещенных друг относительно друга круговых цилиндров. Центр цилиндра, моделирующего гору, был смещен к юго-востоку от центра цилиндра-впадины.

Результаты численного решения задачи в предположении об **однородном** океане на f –плоскости представлены на Рисунке 5. (Приближение f –плоскости выбрано из-за недостатков метода, проявляющихся в решениях в β -приближении).

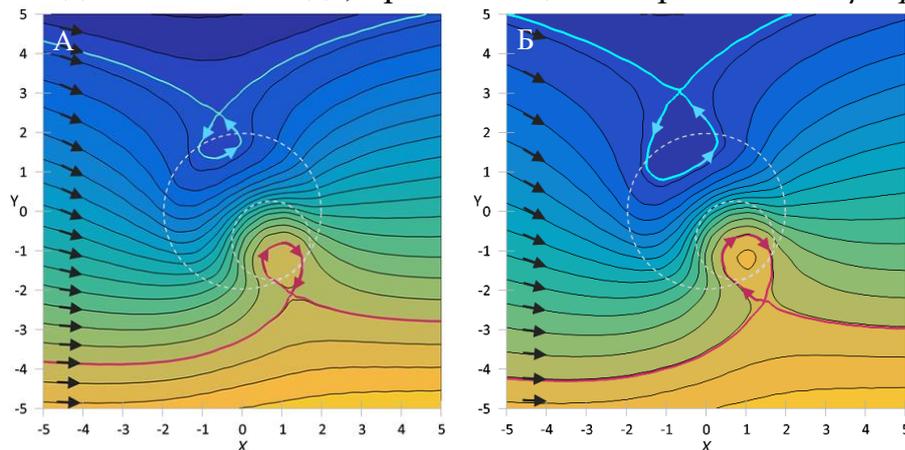


Рисунок 5. Линии тока горизонтального движения в однородном океане, полученные численно при разных скоростях фонового течения: $u = 0.008$ (панель А), $u = 0.006$ (панель Б), границы структуры «впадина-гора» обозначены штрихом. Внутренние области петель сепаратрис ассоциируются с *Кипрской вихревой системой*: голубая петля - циклон, красная - антициклон

(Однородный океан более чувствителен к изменениям скорости; при скорости $u = 0.01$ (1 см/с), (этот случай в автореферате не представлен), топографические вихри не формировались (петля сепаратрисы вырождалась в точку, и сама сепаратриса исчезала)).

Решения (Рисунок 5) демонстрируют формирование циклона, размеры которого сопоставимы с размерами Кипрского вихря. Однако из натуральных наблюдений известно, что циклон представляет собой небольшую вихревую особенность, лишь периодически наблюдаемую рядом с квазистационарным мезомасштабным Кипрским вихрем. С целью устранения вышеописанного несоответствия в работе была уточнена аппроксимация топографии дна вида

«впадина-гора» и добавлена плотностная стратификация через реализацию **трехслойной** модели океана.

Впоследствии впадина и гора аппроксимируются 5-ю цилиндрами каждый, радиусы имеют средний шаг 0.08 (4 км) вдоль радиальной координаты. Высоты каждого цилиндра составляют $\sigma_1 = -0.075$ (150 метров) и $\sigma_2 = 0.2$ (400 метров) для впадины и горы, соответственно. $\tilde{L} = 50$ км — характерный линейный масштаб особенности, являющийся единицей обезразмеривания для координатных осей XY. $\tilde{H} = 2000$ м — единица обезразмеривания для оси Z (размерная средняя глубина моря). Физико-географические параметры модели представлены в Таблице 1:

Параметры	Общая средняя глубина (H)	Высота впадины (H_1)	Высота горы (H_2)	Радиус впадины (R_1)	Радиус горы (R_2)
Размерные величины, (км)	2	0.75	2	75	50
Безразмерные величины	1	0.375	1	1.5	1

Таблица 1. Батиметрические параметры структуры «впадина-гора»

Для более детального описания вертикального распределения вихрей обработаны STD-профили из двух океанографических экспедиций, CУВО-18, проведенной с 16 по 25 августа 2004 года, и CУВО-20 с 16 по 24 мая 2006 года (Zodiatis et al. 2023) и произведены оценки плотности морской воды до 700 м.

Разница между максимальным (ρ_{max}) и минимальным (ρ_{min}) значениями плотности в каждом наборе экспедиционных данных разделена на три равные части $\Delta = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{3}$ для целей реализации трехслойной МКД-модели.

Затем, используя значения плотности $\rho_{min} + \Delta$ и $\rho_{min} + 2\Delta$, по вертикальным профилям плотности найдены глубины этих слоев. Усредненные толщины слоев воды для обеих экспедиций составили: 75 метров для первого слоя воды (\tilde{D}_1) и 315 метров для второго слоя воды ($\tilde{D}_1 + \tilde{D}_2$) (Рисунок 6).

Далее проводилось интегрирование функции плотности в каждом слое воды, чтобы вычислить средние плотности жидкости в каждом из слоев ρ_1, ρ_2 и ρ_3 . Задача решалась в приближении квазибаротропного океана, допустимом при условии отсутствия бароклинных мод.

Получены значения: $f = 0.8 \cdot 10^{-4} \text{c}^{-1}$ (на широте 34°), числа Фруда ($F_n = \frac{\rho_0 (fL)^2}{(g\Delta\rho_n \tilde{D})}$): $F_1 = 1.44$, $F_2 = 1.32$; $\rho_0 = 1030.4 \text{ кг/м}^3$ (средняя плотность всей толщи воды), $\Delta\rho_1 = \rho_2 - \rho_1 = 1.67 \text{ кг/м}^3$, $\Delta\rho_2 = \rho_3 - \rho_2 = 1.82 \text{ кг/м}^3$. Толщины D_j и плотности ρ_j каждого слоя j в трехслойной МКД-модели даны в Таблице 2:

Номер слоя, j	1	2	3
Толщина, \tilde{D}_j (м)	75	240	1685
Толщина, D_j (безразмерная)	0.0375	0.1200	0.8425
Плотность, ρ_j (кг/м ³)	1027.90	1029.57	1031.39

Таблица 2. Параметры трехслойной модели

Общая размерная толщина воды \tilde{D} принималась равной 700 м, что соответствует высоте столба морской воды над плоской вершиной горы Эратосфена. Генерация вихревых структур происходила только над топографией модели, т.е. вплоть до глубин 700 м от поверхности моря. Сама топография была включена в нижний слой на глубину $\tilde{H} = 2000$ м.

Значение плотности воды на глубинах ниже 700 метров меняется незначительно, поэтому полученные данные по плотности мы экстраполировали на весь нижний слой, т. е. до глубин 2000 м. Таким образом, общая толщина \tilde{D} равна 2000 м, и $D_1 + D_2 + D_3 = 1$.

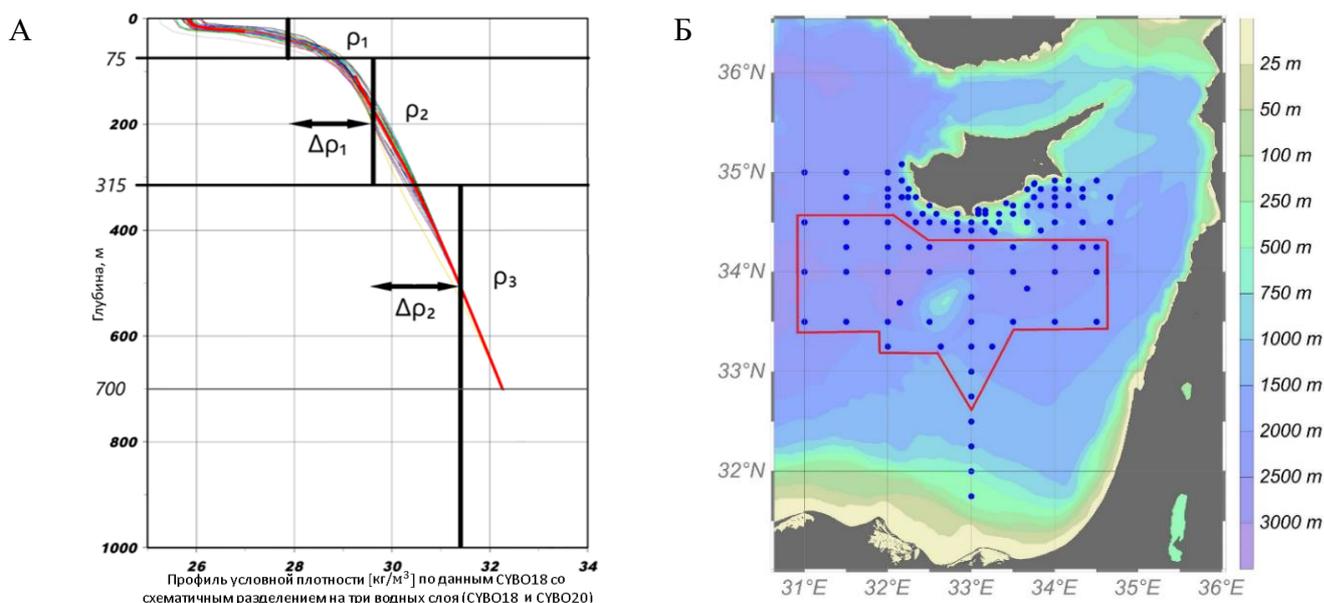


Рисунок 6. Панель А: Профиль условной плотности вод южнее острова Кипр, рассчитанный по 64 STD-профилям во время СУВО18. Разделение океана на три водных слоя по данным СУВО18 и СУВО20 наложено сверху, при этом каждый водный слой характеризуется своим средним значением плотности ρ_1, ρ_2 и ρ_3 , которые дают соответствующие два скачка плотности $\Delta\rho_1$ и $\Delta\rho_2$.

Панель Б: Экспедиционные станции показаны синим цветом, а станции, используемые для целей настоящей работы, обведены красным контуром.

Данные обработаны в программном обеспечении Ocean Data View. Средние по глубине скорости одинаковы для всех слоев и находятся в диапазоне $\bar{U} = 0.007 \div 0.02$ (в зависимости от широты)

Трехслойная модель океана предполагает вертикально усредненную скорость внешнего потока, которая, очевидно, намного меньше наблюдаемой скорости на морской поверхности. Получены оценки средних значений скорости набегающего потока \bar{U} , характеризующего исследуемую область.

На основе океанографических in-situ данных (STD-профили с рейсов СУВО-18 и СУВО-20, Zodiatis et al. 2023) проведен количественный анализ распределения скоростей течений с глубиной. Средняя скорость определялась путем усреднения значений U_j в каждом из слоев j :
$$\bar{U} = \frac{U_1\tilde{D}_1 + U_2\tilde{D}_2 + U_3\tilde{D}_3}{\tilde{D}}$$

Далее, на широте 33° с. ш., полученное среднее значение $\bar{U} = 0.007$ (7 мм/с) использовалось как минимальное значение входящего восточного потока, а на

широте 34° с. ш. полученное значение $\bar{U} = 0.02$ (2 см/с) принималось за максимальную скорость морского течения. Этот диапазон необходим для последующего моделирования влияния течения ММЖ, протекающего на широте 34° с. ш., на генерацию *Кипрской вихревой системы*.

Значения скорости ММЖ на поверхности моря обычно достигают значений в диапазоне $30 \div 35$ см/с по сравнению со средней поверхностной скоростью $10 \div 15$ см/с. Моделировался сдвиг скорости в северных точках области. В результате получен приблизительный интервал скоростей $\bar{U} = 0.007 \div 0.02$.

Таким образом, поставлена математическая задача: фоновый (преимущественно восточный) поток набегает на неоднородность донной топографии (типа «впадина-гора»), локализованную в нижнем слое трехслойной жидкости в центре модельной области на безразмерной плоскости XY. Ось OX ось направлена вдоль параллели на восток, а ось OY вдоль меридиана на север, (безразмерная область $-8 \leq x, y \leq 8$).

Проведены **четыре** серии экспериментов с использованием различных внешних полей скорости:

- (1) однородно зональное течение $\Psi_{(0)} = -\bar{U}y$ направленное на восток,
- (2) течение северо- или юго-восточного направления $\Psi_{(0)} = -\bar{U}y + \bar{V}x$,
- (3) восточное течение, усиливающееся вдоль меридиана, т.е. имитирующее ММЖ,
- (4) однородно зональное течение $\Psi_{(0)} = -\bar{U}y$, переносящее свободные океанические вихри.

Функция $\Psi_{(0)}$ рассматривает зональные (\bar{U}) и меридиональные (\bar{V}) скорости вертикально-однородного фонового течения. Она определяется (Соколовский 1991) путем выбора поля скоростей внешнего потока.

В ходе численных экспериментов (1) с постоянными скоростями $\bar{U} \leq 0.01$ в **трехслойной** МКД-модели наблюдалось формирование двух топографических вихрей: циклона (синяя область) и более крупного антициклона (красная область) (например, Рисунок 7). В среднем, диаметр антициклона в верхнем слое фиксировался в пределах 120-150 км, в то время как диаметр циклона изменялся в более широком диапазоне (от 20 км при $\bar{U} = 0.01$ до 75 км при $\bar{U} = 0.007$).

Сравнение рисунков показало значительное сужение циклона к поверхности моря. Антициклон был более однородным по вертикали, он сужался к поверхности моря, но незначительно.

Результаты моделирования показали, что по мере увеличения средней скорости \bar{U} , захватывающие способности рельефа дна ослабевают. В наибольшей степени это затронуло впадину, влияющую на образование циклона. Например, в численных экспериментах со скоростью $\bar{U} = 0.011$ циклон не генерировался в верхнем слое, где петля сепаратрисы выродилась в точку. Пространственный масштаб циклона в среднем слое значительно уменьшился. (Этот случай на рисунках не изображен). Далее (на Рисунках 8-14) нижний слой не рассматривается, поскольку вихреобразующее проявление рельефа в нем всегда максимально.

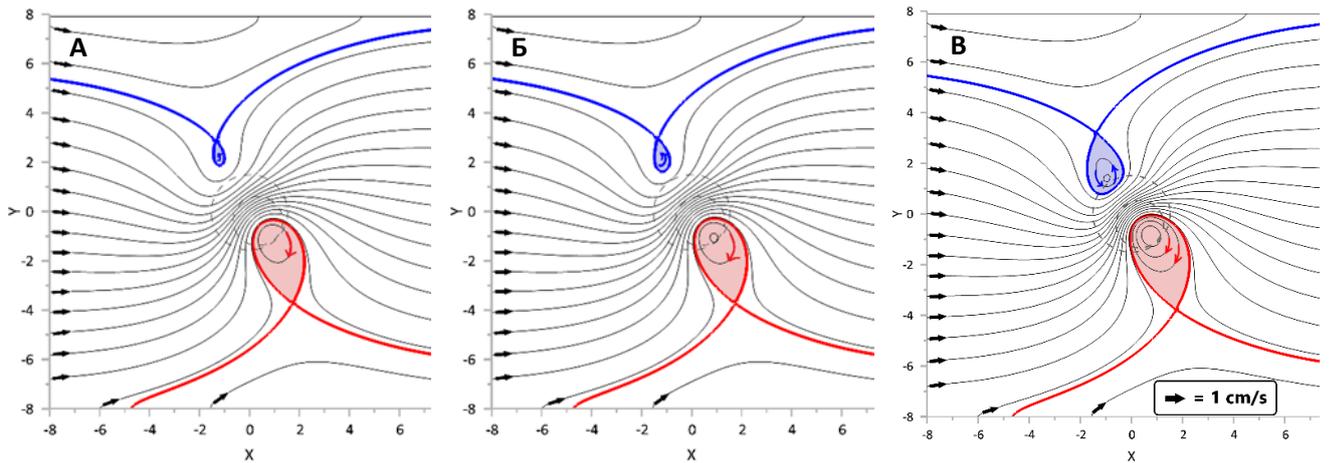


Рисунок 7. Линии тока горизонтального движения в модельном трехслойном океане в (А) верхнем, (Б) среднем и (В) нижнем слоях, при постоянном зональном потоке $\bar{U} = 1 \text{ cm/s}$, $\bar{V} = 0$ (жирные стрелки указывают направление движения), штриховая линия обозначает границу структуры «впадина-гора», а внутренние части петель сепаратрис ассоциируются с захваченными топографическими вихрями *Кипрской вихревой системы*: циклон (синяя область) и более крупный Кипрский вихрь (красная область), эксперимент (1)

Антициклонический Кипрский вихрь образуется во всех трех слоях со скоростями потока $\bar{U} = 0.015 \div 0.02$, тогда как циклонический вихрь генерируется только в нижнем слое. При скоростях $\bar{U} \geq 0.025$ в верхнем и среднем слоях образование вихрей не зафиксировано, в нижнем слое присутствует только антициклонический Кипрский вихрь. При скоростях $\bar{U}_c \geq 0.037$ вихреобразование отсутствует во всех слоях.

В экспериментах (2) с северо-восточным фоновым потоком ($\bar{V} > 0$, например, Рисунок 8) зафиксировано «подавление» циклона, поскольку в этом случае поток достигает область воздействия впадины после того, как приобретает антициклоническую закрутку под воздействием подводной горы.

Напротив, в случае юго-восточного потока ($\bar{V} < 0$, Рисунок 9) циклон демонстрирует большую устойчивость, поскольку открытый край впадины первым «встречает» набегающий поток, в результате чего в нем инициируется циклоническая завихренность.

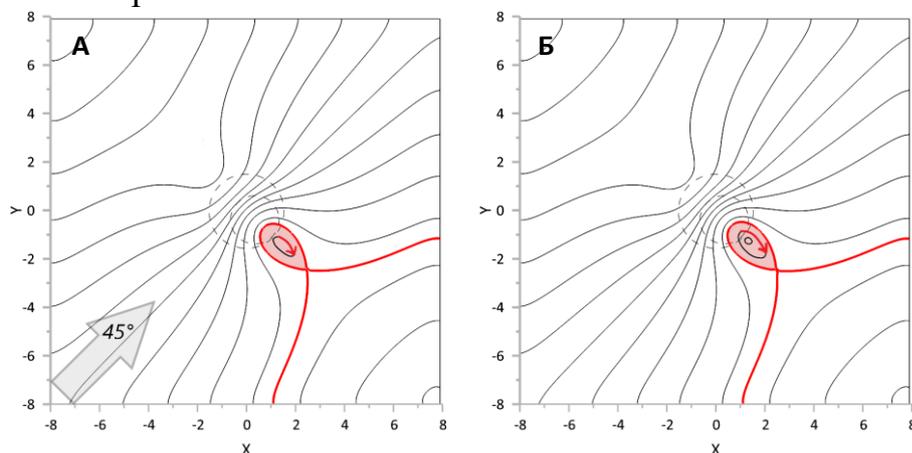


Рисунок 8. Линии тока в (А) верхнем и (Б) среднем слоях при постоянной скорости фонового потока ($\bar{U} = \bar{V} = 0.009$), направленного на северо-восток под углом $+45^\circ$ вдоль широтного круга. Топография «впадина-гора» обозначена штриховой линией, эксперимент (2)

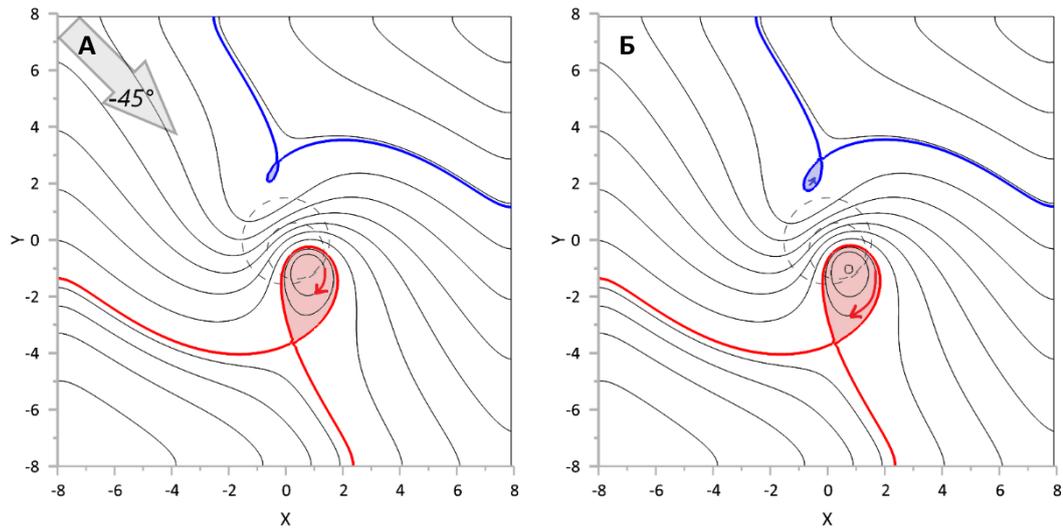


Рисунок 9. Линии тока в (А) верхнем и (Б) среднем слоях при постоянной скорости потока ($\bar{U} = -\bar{V} = 0.009$), направленного на юго-восток под углом -45° . Топографическая структура «впадина-гора» обозначена штриховой линией, эксперимент (2)

Эксперименты (3) с меридиональным градиентом скорости фонового восточного потока ($\bar{U} > 0$, $\bar{V} = 0$, антициклонический сдвиг, увеличение скорости фонового потока \bar{U} в 1.4 раза на участке от -4 до $+4$ по оси Y), например:

$$\bar{U} = \begin{cases} 0.008, & y \leq -4, \\ 0.008 + 0.0003(y + 4), & y > -4; \end{cases} \quad \Psi^{(0)} = - \begin{cases} 0.008y, & y \leq -4, \\ 0.008y + 0.0003\left(\frac{y^2}{2} + 4y\right), & y > -4 \end{cases}$$

свидетельствуют о формировании как циклона, так и антициклона (Кипрского вихря) во всех трех слоях (Рисунок 10). Размер циклона на поверхности не превышает 20 км. Его можно охарактеризовать как вихревую особенность. (Под размером вихря понимается средний горизонтальный масштаб петли сепаратрисы функции тока).

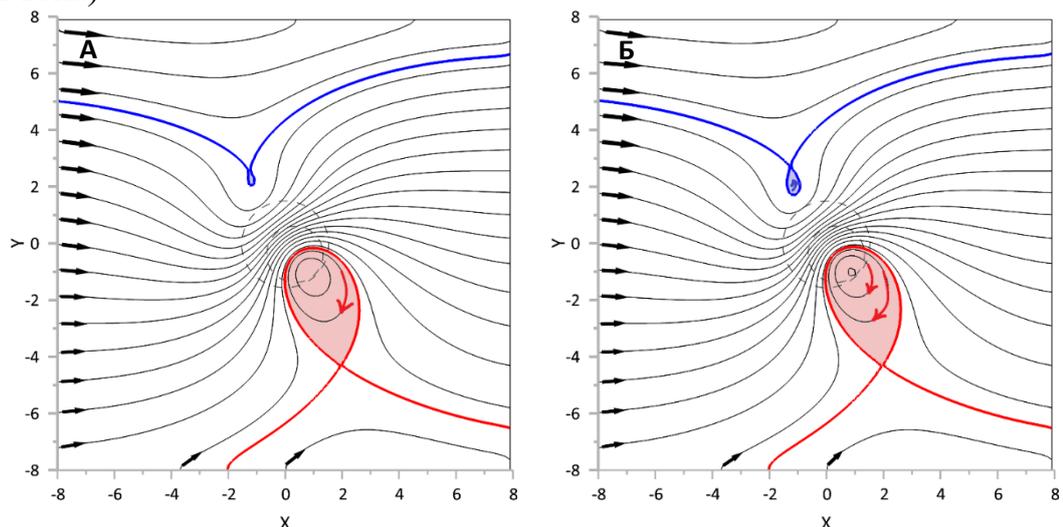


Рисунок 10. Линии тока в (А) верхнем и (Б) среднем слоях с набегающим фоновым потоком вида (2.6.1). Длины черных стрелок пропорциональны скоростям потока: самая короткая стрелка отвечает скорости $\bar{U} = 0.008$ (0.8 см/с), а самая длинная $-\bar{U} = 0.0116$ (1.16 см/с). Сдвиг скорости происходит в области $y > -4$. Топографическая структура «впадина-гора» отмечена штриховой линией, внутренние части сепаратрис связаны с захваченными топографическими вихрями, эксперимент (3)

Увеличение скорости фонового потока \bar{U} в 1.4 раза, т.е. от 0.008 (0.8 см/с) до 0.0112 (1.12 см/с), на участке от -4 до $+4$ по оси Y :

$$\bar{U} = \begin{cases} 0.008, & y \leq -4, \\ 0.008 + 0.0004(y + 4), & y > -4; \end{cases} \Psi^{(0)} = - \begin{cases} 0.008y, & y \leq -4, \\ 0.008y + 0.0004\left(\frac{y^2}{2} + 4y\right), & y > -4 \end{cases}$$

приводит к тому, что циклон не формируется в верхнем слое и заметно ослабляется в среднем слое (Рисунок 11).

Захватывающее свойство впадины усиливается в случае обратного градиента скорости (циклонического сдвига), т.е. при более высоких скоростях на южных границах модельной области (Рисунок 12). Например при:

$$\bar{U} = \begin{cases} 0.008, & y \geq 4, \\ 0.008 - 0.0015(y - 4), & y < 4; \end{cases} \Psi^{(0)} = - \begin{cases} 0.008y, & y \geq 4, \\ 0.008y - 0.0015\left(\frac{y^2}{2} - 4y\right), & y < 4 \end{cases}$$

зафиксировано значительное уменьшение размеров антициклона (в некоторых экспериментах – даже его полное исчезновение) и, напротив, существенное доминирование циклона. Повышенные скорости в окрестности подводной горы препятствуют формированию крупномасштабного антициклона. Это обстоятельство, а также уменьшение скорости над впадиной, способствуют усилению циклона.

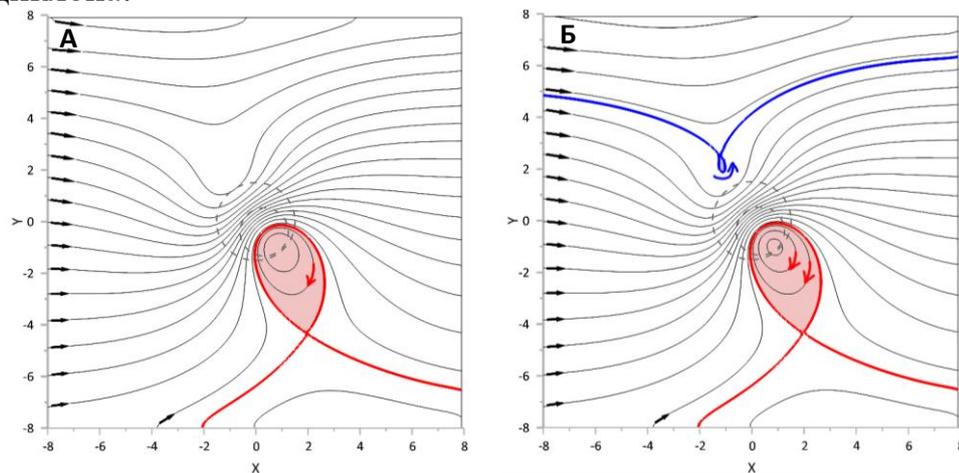


Рисунок 11. То же, что и на Рисунке 10, но теперь самая короткая стрелка соответствует скорости $\bar{U} = 0.008$ (0.8 см/с), самая длинная – скорости $\bar{U} = 0.0128$ (1.28 см/с). Сдвиг скорости задается при $y > -4$. В верхнем слое циклон не формируется, эксперимент (3)

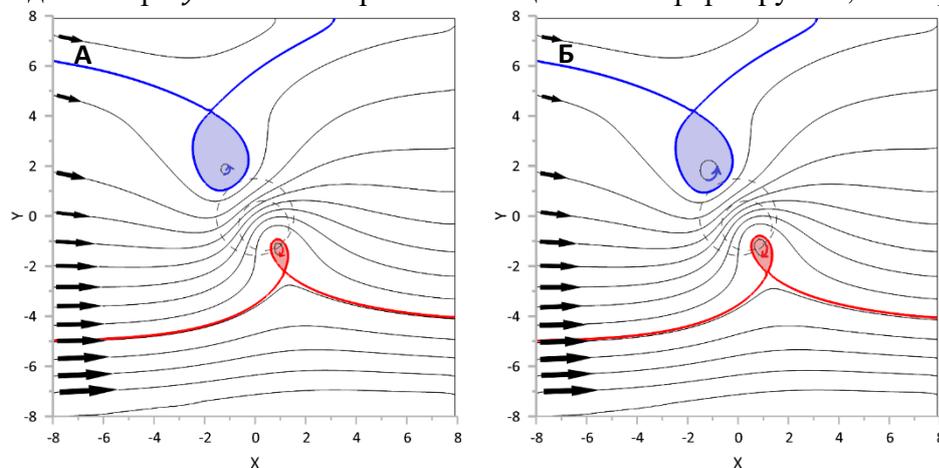


Рисунок 12. То же, что и на рис. 10, но для внешнего потока с обратным градиентом скорости: самая короткая черная стрелка соответствует скорости $\bar{U} = 0.008$ (0.8 см/с), самая длинная – скорости $\bar{U} = 0.0245$ (2.45 см/с). Сдвиг скорости задается при $y \leq 4$, эксперимент (3)

Все вышеупомянутые ситуации соответствуют правилу, согласно которому вихрь не может образоваться над рельефом, если скорости фонового течения превышают некоторые критические значения. В этой ситуации ослабляются захватывающие способности рельефа.

В диссертационной работе рассмотрено, как первоначально осесимметричные вихревые пятна (свободные океанские вихри, переносимые внешним течением) взаимодействуют с *Кипрской вихревой системой* (эксперименты (4)). Основной акцент делается на то, как они влияют на структуру фазового портрета при прохождении неоднородности «впадина-гора». Анализируется процесс топографического захвата вихревых пятен.

В случаях, когда топографический вихрь и вихревое пятно, движущееся во внешнем течении, имеют один знак, размер вихря увеличивается (напомним, что под размером вихря понимается средний горизонтальный размер петли сепаратрисы поля функции тока). Потенциальная завихренность ζ сохраняется, происходит увеличение относительной завихренности системы вихрей. Вихревое пятно либо захватывается соответствующим топографическим вихрем, либо протискивается между топографическими вихрями. Эта область характеризуется струйным течением с достаточно высокой плотностью линий тока. Близкие к ней вихревые пятна, в частности, расположенные около оси ОХ, всегда проходят сквозь эту деформационную область, существенно вытягиваясь по форме.

1) При взаимодействиях антициклонического пятна верхнего слоя с антициклоническим Кипрским вихрем ядро вихревого пятна часто не захватывается. Пятно набегает на *Кипрскую вихревую систему* вместе с фоновым течением восточного направления и проходит по периферии Кипрского вихря, тем самым увеличивая его горизонтальный размер. Впоследствии пятно отделяется от системы и продолжает двигаться вниз по течению.

Однако, когда антициклоническое пятно расположено в среднем слое, то наблюдается его существенный захват топографией (Рисунок 13). Эксперименты показывают, что антициклонические пятна среднего слоя сильнее меняют картину вихревого течения, они «стремятся слиться» с антициклоническим Кипрским вихрем. Лишь небольшая их часть продолжает движение вниз по течению.

В обеих ситуациях, когда антициклоническое пятно достигает *Кипрской вихревой системы*, топографический циклон формируется, но подавляется. В конце концов, линии тока возвращаются к своей первоначальной форме. Размер Кипрского вихря увеличивается.

2) В потоке северо-восточного направления ($\Psi_{(0)} = -\bar{U}y + \bar{V}x$; $\bar{U}, \bar{V} = 0.011$, Рисунок 14), циклон не формируется. Входя в *Кипрскую вихревую систему*, антициклоническое пятно верхнего слоя имеет тенденцию проходить по периферии Кипрского вихря, увеличивая его в размере (Панели Б-В). При дальнейшем продвижении пятна на северо-восток Кипрский вихрь несколько смещается к юго-восточному краю горы Эратосфена, в данном случае примерно на 20 км (Панель Г). Захватывающие способности горы проявляются сильнее (по

сравнению со случаем восточного направления потока), небольшая часть вихревого пятна попадает внутрь петли сепаратрисы поля функции тока вихря.

3) При взаимодействии циклонического пятна с топографическим циклоном ядро пятна захватывается как в верхнем, так и в среднем слоях (в автореферате не представлено). Такая ситуация может наблюдаться по причине того, что центральная ось струйного течения находится ближе к антициклоническому Кипрскому вихрю, и циклоническая окрестность оказывается менее подверженной его воздействию. В результате топографический циклон увеличивается в размере, успевая захватить часть циклонического пятна, прежде чем оно будет унесено струйным течением.

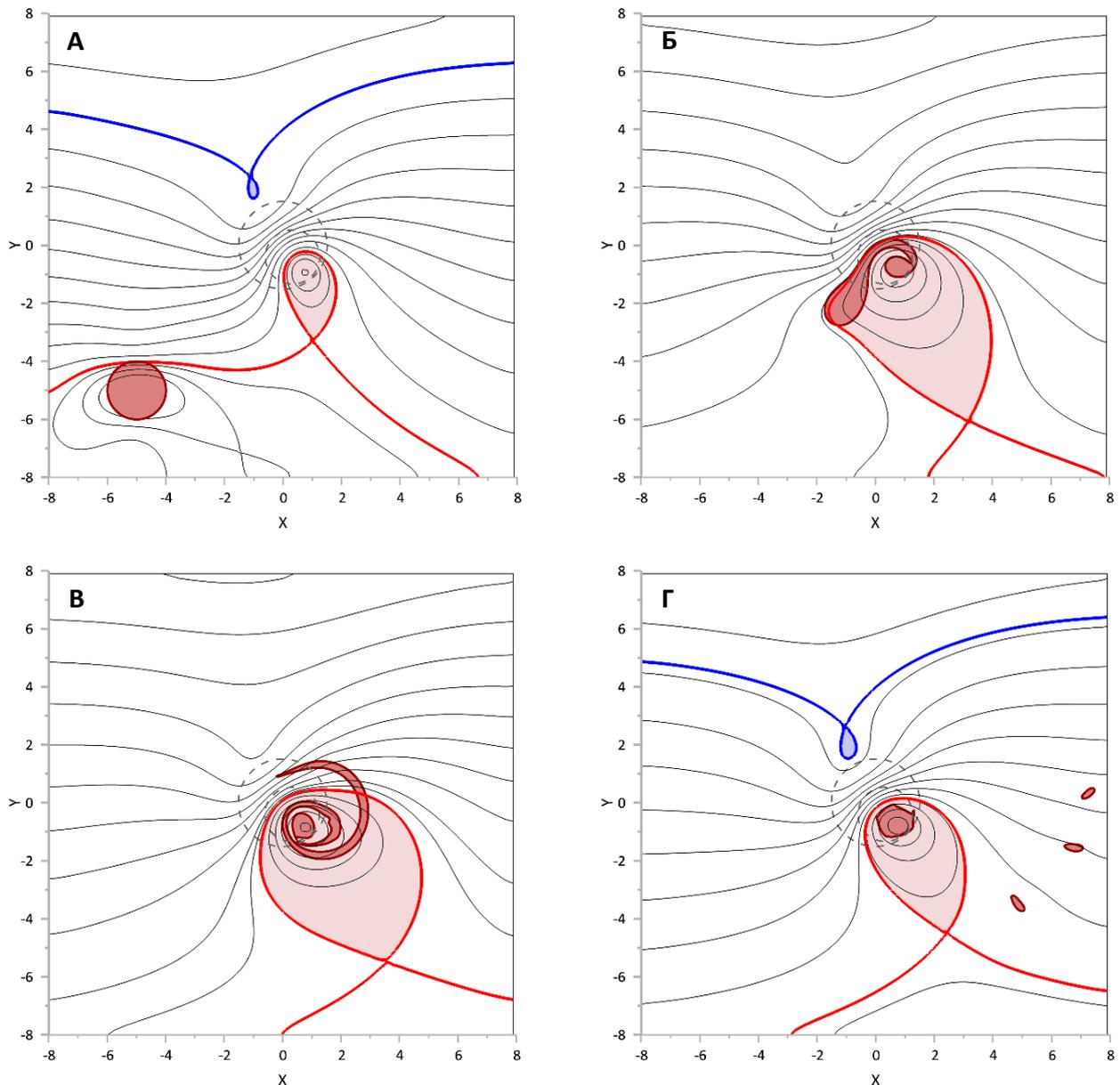


Рисунок 13. Поведение изначально кругового антициклонического вихревого пятна среднего слоя при его набегании с зональным потоком со скоростью $\bar{U} = 0.011$ на *Кипрскую вихревую систему*. Панель А: $t = 0$, $R = 1.0$, потенциальная завихренность $\zeta = -0.8$, $(-5.0; -5.0)$ – начальные координаты центра красной области (вихревое пятно), панели Б-В: $t = 400, 450$. Панель Г: $t = 650$, наблюдается захват ядра вихревого пятна областью топографического Кипрского вихря, эксперимент (4)

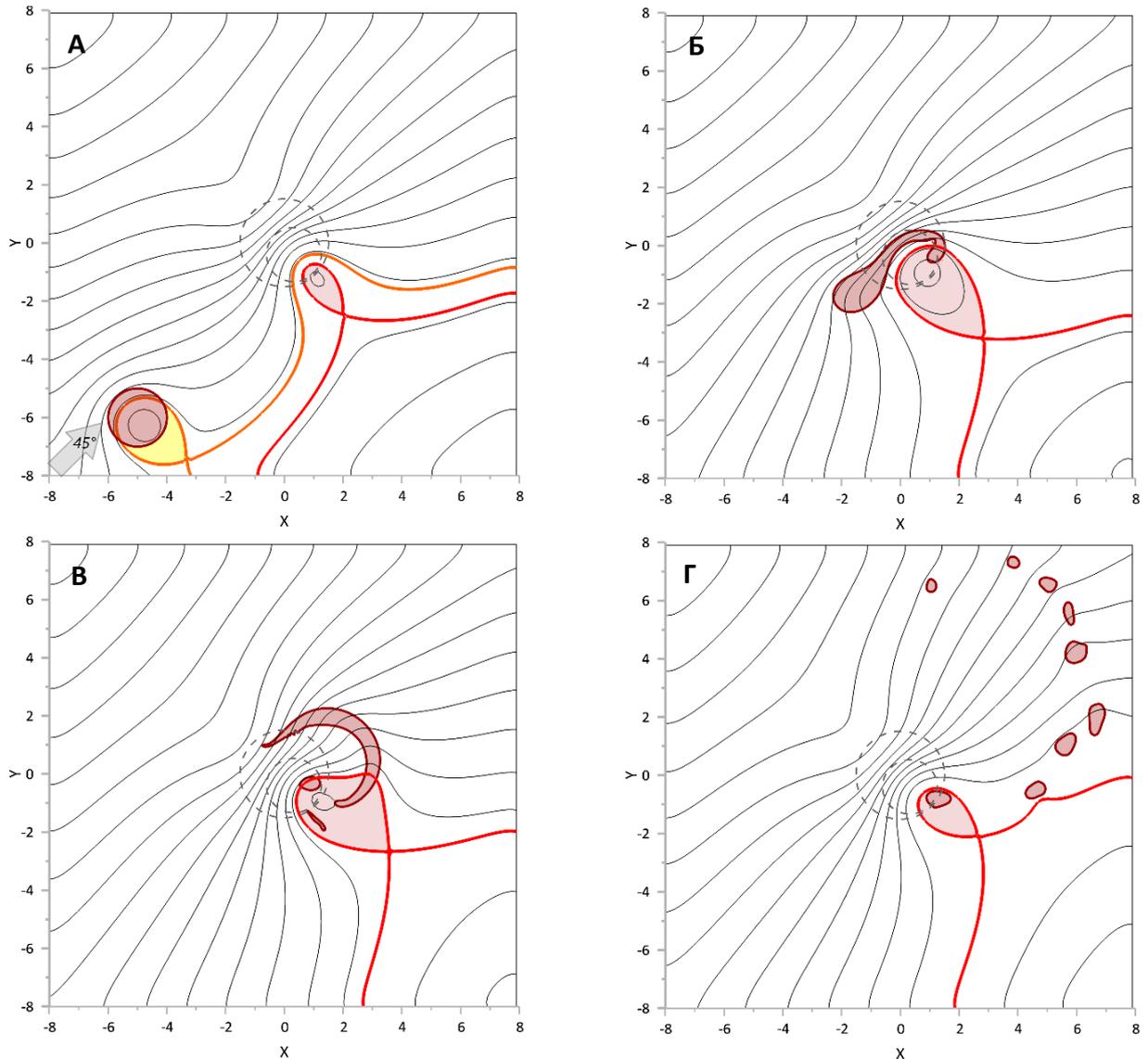


Рисунок 14. Поведение первоначально кругового антициклонического вихревого верхнего слоя при его набегании вместе с фоновым течением *северо-восточного направления* ($\bar{U} = \bar{V} = 0.011$) на *Кипрскую вихревую систему*. Панель А: $t = 0$, $R = 1.0$, $\zeta = -1.6$, $(-5.0; -6.0)$ – начальные координаты центра красной области (вихревого пятна); желтым цветом закрашена внутренняя область петли сепаратрисы поля функции тока, порожденной воздействием вихревого пятна. Панели Б-В: $t = 500, 600$, пятно перемещается вниз по течению. Кипрский вихрь смещается к юго-восточному краю горы Эратосфена. Панель Г: $t = 1000$, часть ядра захвачена горой, остальные части выносятся потоком из области неоднородности топографии, эксперимент (4)

Глава 3 (результаты отражены в статьях Зырянов, Егорова 2022, Egorova et al. 2023 и в тезисах докладов Егорова и др. 2018-2023) содержит результаты лабораторных экспериментов.

Эксперименты проводились в лаборатории гидродинамики ИВП РАН на специальной установке. В ее основе лежит вращающаяся против часовой стрелки платформа с установленной на неё ёмкостью для жидкости. Ёмкость представляет собой цилиндрический стеклянный сосуд высотой 38 см, диаметром 30 см и фальшь-дном того же диаметра.

В фальшь-дно внутри сосуда встроена подводная неоднородность, вид и размеры которой подбираются в соответствии с аппроксимируемым рельефом морского дна. Фальшь-дно позволяет проводить эксперименты не только с возвышенностями (горами), но и с понижениями (впадинами), а также их комбинациями любой формы: цилиндрической, параболической. Изготавливаются формы (как и фальшь-дно) на современном 3D-принтере Prusa i3 MK3.

Сосуд может наполняться различными жидкостями: вода, раствор глицерина, масло. Это требуется для достижения определенных значений вязкости жидкости и/или имитации слоистой жидкости. Предусмотрена и система поворота неосесимметричной модели рельефа вокруг своей оси: фальшь-дно имеет 12 круговых отверстий, что позволяет поворачивать модели с угловым шагом в 30° . Учитывается, что линейные скорости у границы ёмкости выше.

Платформа приводится в движение с помощью электромотора с импульсным питанием. Управление электромотора осуществляется через программируемый модуль «Arduino Uno». Обратная связь реализована через систему постоянных магнитов, установленных под платформой, и датчика Холла.

После запуска платформы требуется некоторое время для раскрутки всей установки и выхода на стационарный режим твердотельного вращения. Система меняет количество подаваемых на электромотор импульсов и интервалы между ними в соответствии с предварительно вычисленным значением угловой скорости, чтобы скорость вращения платформы соответствовала заданной скорости, например, 15-20 оборотов в минуту с точностью до двух/трех оборотов в минуту.

Когда достигнуто состояние твердотельного вращения, оно (вращение) начинает останавливаться. Жидкость продолжает вращаться по инерции, т. е. появляется движение жидкости относительно неподвижной топографии, позволяющее зафиксировать кратковременное формирование вихря. Одновременно с этим происходит плавное добавление красящего вещества рядом с подводным препятствием для визуализации движения жидкости. Добавление красочного элемента осуществляется через малые отверстия в тонком полом стержне или пластине.

Чтобы избежать влияния кривизны свободной поверхности жидкости на топографический вихрь при больших скоростях вращения резервуара, в ранних экспериментах сверху на штативе располагалась круглая пластиковая пластина. В результате слой жидкости над подводным объектом был фиксирован по высоте \bar{D} .

В качестве критерия подобия было взято число Кибеля-Россби $R_o = \frac{\bar{U}}{fL}$, где L — характерный масштаб донной неоднородности. Для соответствия критерию подобия требовалось увеличить вязкость жидкости (что приравнялось уменьшению скорости внешнего потока и способствовало «погашению» рывков скорости). Был взят 30%-ный раствор глицерина, кинематическая вязкость которого $\nu_{lab} = 2.330 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Кинематическая вязкость чистой воды при тех же условиях составляет $\nu_{lab} = 1.006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Первая, тестовая, задача решалась для случая неоднородности рельефа дна в виде двух соосных цилиндров разных радиусов, помещенных один над другим. В эксперименте с 30%-ым раствором хорошо наблюдался цилиндрический столб

Тейлора над меньшим из цилиндров (Рисунок 15). В момент вытягивания цилиндров ($t = 1$ с) в область над ними высыпалась алюминиевая пудра (панель А). Поток подкрашенной жидкости подхватывался течением и сносился в сторону (панель Б, $t = 8$ с). Вихрь, захваченный цилиндром, не покидал область захвата, продолжительное время циркулировал антициклонически над меньшим цилиндром (панель В, $t = 28$ с).

Удалось подтвердить образование вертикальных слоев Стьюартсона над боковыми границами цилиндров: видна четкая жидкая вертикальная граница вихря, особенно отчетливая над меньшим цилиндром.



Рисунок 15. Кадры видеозаписи эксперимента с двумя соосными цилиндрами разных радиусов и 30%-ым раствором глицерина. Панель А: $t = 1$ с, добавляется алюминиевая пудра на вытягивающиеся из фальшь-дна соосные цилиндры. Панель Б: $t = 8$ с, подкрашенный поток жидкости сносится течением. Панель В: $t = 28$ с, наблюдается цилиндрический антициклонический столбик Тейлора, движущийся в направлении, указанном черной стрелкой, также наблюдается четкая жидкая вертикальная граница вихря, особенно отчетливая над меньшим цилиндром, - вертикальные слои Стьюартсона

В эксперименте с 30%-ым раствором глицерина и неоднородностью дна вида «впадина (1)-гора (2)» (Рисунок 16), встроенным в фальшь-дно (3), видно, как подкрашенная чернилами (4) жидкость набегает на параболическую впадину (1) с выходящей из неё параболической горой (2), расположенной ближе к оси вращения. Далее, жидкость разделяется на два потока, каждый из которых подкручивается в свою сторону (панель А, $t = 1$ с, скорость набегания уже мала). Гора (2) инициирует антициклоническую закрутку: на рисунке наблюдается закручивающаяся по часовой стрелке спираль чернил над «подводной» горой (панели Б-В, $t = 17; 25$ с).

В эти же моменты времени видно, как над впадиной (1) проходят потоки жидкости, «пытаясь» закрутиться циклонически. Скорость потока над впадиной больше, чем над горой, так как впадина находится дальше от оси вращения сосуда. Такое расположение было выбрано не случайно, поскольку учитывалась аналогия с реальным течением ММЖ, протекающим севернее *Кипрской вихревой системы* над впадиной. Предположительно, циклон над впадиной не успевает полностью сформироваться, его сносит течение.

На панели Г ($t = 37$ с) видно, как часть потока (5) успела продвинуться в сторону от впадины (1), при этом антициклон (6) остался на прежнем месте над горой (2). В этот же момент наблюдалось замыкание кольца чернил (7) над

впадиной (1). Циклон (7) оказался неустойчивым и быстро был унесен от подводного препятствия течением.

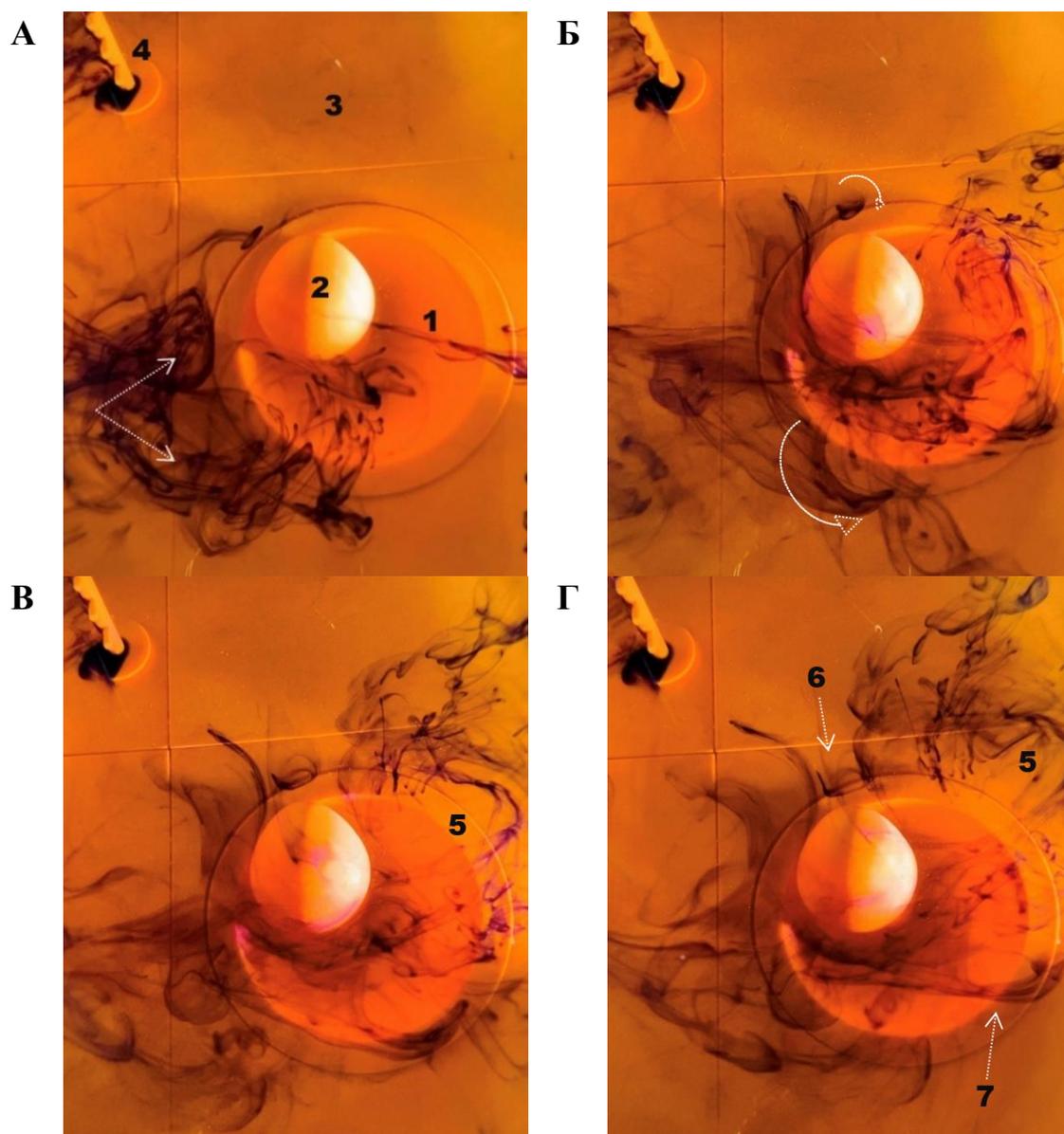


Рисунок 16. Эксперимент с параболической системой *впадина* (1)-*гора* (2), встроенных в фальшь-дно (3), и 30%-ым раствором глицерина во вращающейся ёмкости (вид сверху). Из канала (4) впрыскиваются чернила. Панель А: $t = 1$ с, фоновый поток расходится на две части. Панели Б-В: $t = 17; 25$ с, поток над горой (1) закручивается как, потоки над впадиной (2) подкручиваются циклонически. Панель Г: $t = 37$ с, объем (5) сносит в сторону, при этом антициклон (6) фиксирован на месте. Циклон (7) наблюдается над впадиной и впоследствии исчезает, сносясь в сторону течением

Результаты математического и лабораторного моделирования задачи о Кипрском вихре (Главы 1-3) сравнивались с данными, полученными во время экспедиций СУВО-18 и СУВО-20 в соответствующем регионе над горой Эратосфена. Валидация результатов моделирования проводилась в основном с использованием этих двух экспедиций, поскольку их данные были использованы для расчета вертикального распределения плотности, применяемого при численном моделировании (Глава 2).

Карта высот морской поверхности, полученная с использованием натуральных данных, собранных в августе 2004 года во время экспедиции СУВО-18, показывает одну из возможных картин течений юго-восточной части Левантийского бассейна (Рисунок 17, панель А). На рисунке показан крупномасштабный антициклонический Кипрский вихрь (Панель А, 1), являющийся доминирующей особенностью региона. Его центр расположен к востоку от горы Эратосфена (33° в.д., $33^{\circ}30'$ с.ш.).

Более слабый циклон (Панель А, 3) меньшего масштаба сосуществует вблизи западных границ Кипрского вихря. Вторичный мезомасштабный антициклонический вихрь, расположенный дальше к востоку от горы Эратосфена и Кипрского вихря, ассоциируют с вихрем Шикмона (Панель А, 2). Поток восточного направления, движущийся со скоростями $0.1-0.2$ м/с вдоль северной периферии топографического Кипрского вихря и циклона (оценки получены из «Средиземноморской системы прогнозирования» во время СУВО-18), соотносят со струйным течением ММЖ (Панель А, 4).

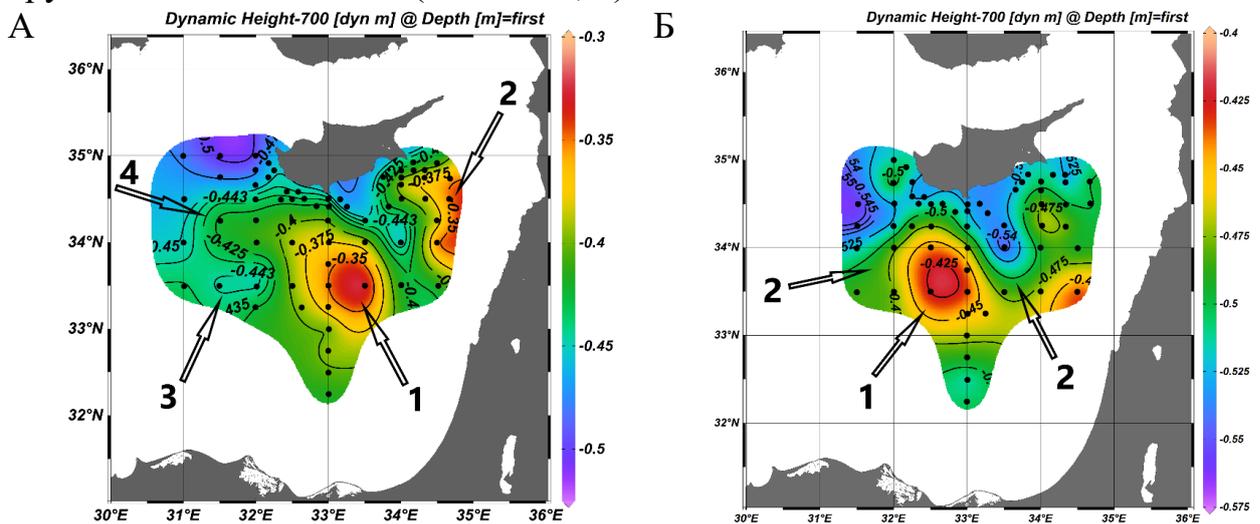


Рисунок 17. Панель А: ВМП (Dynamic Height) Левантийского бассейна южнее острова Кипр во время рейса СУВО-18, август 2004 г. Показаны Кипрский вихрь (1) и вихрь Шикмона (2), циклон (3) к западу от Кипрского вихря и восточное течение (4), текущее вдоль северных границ *Кипрской вихревой системы*. Панель Б: ВМП того же региона во время рейса СУВО-20, май 2006 г. Показано преобладание Кипрского вихря (1) и восточного течения (2), текущего вдоль его северо-западной, северной и восточной границ. Черными точками показаны места расположения измерительных станций, шкала ВМП градуирована в метрах

Аналогично, динамическая топография высот, она же высота морской поверхности (ВМП), полученная на основе натуральных данных, собранных в мае 2006 года во время рейса СУВО-20, демонстрирует преобладание мезомасштабного Кипрского вихря (Рисунок 17, Панель Б, 1). Кроме того, в этот период Кипрский вихрь располагался почти на вершине горы Эратосфена, т.е. к западу от 33° в. д. и вдоль $32^{\circ}30'$ с. ш.

Кипрский вихрь окружен меньшими циклоническими вихрями на его южном и восточном фронтах, в то время как большая циклоническая активность к северо-западу от него обусловлена восточным продолжением круговорота Родоса.

Топографический циклон предположительно подавляется мощным струйным течением ММЖ (Панель Б, 2), которое проходит вдоль западной, северной и восточной периферий Кипрского вихря (скорости течения 0.25-0.35 м/с согласно данным «Средиземноморской системы прогнозирования», полученным в тот же период СУВО-20). Более того, это течение разделяет вихрь Шикмона (антициклонический вихрь к востоку от горы Эратосфена у берегов Ливана) на два меньших вихря.

Панели А-Б Рисунка 17 демонстрируют качественное согласие между представленными в работе численными результатами и оценками, полученными по данным экспедиций СУВО-18 и СУВО-20 (данные предоставлены коллегой из университета Кипра Джорджем Зодиатисом — George Zodiatis).

Поверхностная картина течений частично повторяется на глубине (Zodiatis et al. 2023). Однако, во время СУВО-20, вихрь Шикмона, расположенный восточнее от Кипрского вихря, ослабевает с глубиной, что, по-видимому, говорит о другой природе его формирования (не топографической).

В ЗАКЛЮЧЕНИИ перечислены основные результаты исследования, сформулированы выводы и перспективы дальнейшей разработки темы:

В работе представлены результаты решения задачи топографически индуцированного вихреобразования в водном потоке над неосесимметричной неоднородностью рельефа дна (задача о Кипрском вихре). Разработан алгоритм аналитического решения гидродинамических задач с неосесимметричной топографией дна.

Приведены соображения, позволяющие утверждать, что причиной возникновения системы двух вихрей — циклона и антициклона (Кипрского вихря), расположенных южнее острова Кипр, является воздействие топографии дна вида «впадина-гора» южной части Левантийского бассейна на фоновое течение.

Адаптация численного метода контурной динамики к задаче о Кипрском вихре позволила подтвердить правильность результатов аналитического моделирования. Численные эксперименты по взаимодействию свободных вихрей, переносимых внешним течением, с рельефом дна вида «впадина-гора» привели к выводу, что гора Эратосфена генерирует квазистационарный антициклонический Кипрский вихрь, который может увеличивать (уменьшать) свои горизонтальные размеры при взаимодействии с антициклоническим (циклоническим) свободным вихревым пятном.

Реализация трехслойной МКД-модели океана дополнила картину топографических вихрей *Кипрской вихревой системы*, по сравнению с первым МКД-подходом в приближении однородного океана. В **однородном** решении размеры циклона были сопоставимы с размерами Кипрского вихря. Но известно, что циклон — это небольшая вихревая особенность, лишь периодически наблюдаемая рядом с квазистационарным мезомасштабным Кипрским вихрем.

Плотностная **стратификация**, реализованная через трехслойную МКД-модель океана, устранила вышеописанное несоответствие. Уточненная стратификация была включена в применяемую трехслойную МКД-модель с более

точной формой рельефа морского дна и набегающим потоком различной кинематической структуры и переменных направлений.

Периодическое появление циклона в стратифицированной трехслойной МКД-модели в основном зависело от структуры фонового потока, набегающего с запада на топографию вида «впадина-гора». Проведенные численные эксперименты (1), (2), (3) и (4) показали следующие зависимости:

а) от скорости набегающего восточного потока (эксперименты (1)): до тех пор, пока средняя скорость потока \bar{U} не превышала 0.01, циклон моделировался во всех трех слоях. Когда средняя скорость превышала 0.01, циклон не образовывался в верхнем слое, а при скорости более 0.02 циклон не образовывался вообще.

б) от направления набегающего потока (эксперименты (2)): циклон подавлялся при северо-восточном направлении средней скорости потока, и прекращал свое существование в верхнем и среднем слоях при увеличении угла наклона набегающего потока до $+25^\circ$ вдоль широтного круга, даже в случаях относительно слабых потоков. Для углов, превышающих $+45^\circ$, циклон не возникал в нижнем слое.

Однако в случае юго-восточного направления потока подавление циклона было незначительным. Антициклонический Кипрский вихрь возникал почти во всех рассмотренных случаях, при различных направлениях и значениях скорости внешнего потока.

в) от моделируемого в экспериментах (3) влияния течения ММЖ, протекающего над северной границей структуры «впадина-гора»: положительный меридиональный сдвиг средней зональной скорости способствовал ослаблению циклона вплоть до его отсутствия в верхнем, среднем и нижнем слоях. В то же время было показано, что антициклонический Кипрский вихрь обладает высокой устойчивостью во всех исследованных случаях.

г) от сдвига скорости входящего потока, рассмотренной в экспериментах (3): размер циклона значительно увеличился за счет отрицательного (обратного) меридионального сдвига, в то время как антициклонический Кипрский вихрь уменьшился до размеров небольшой особенности. Это произошло за счет увеличения средней скорости \bar{U} в 2 раза против оси ОУ. Повышенные скорости в окрестности подводной горы препятствовали формированию мезомасштабного антициклона.

Все вышеупомянутые ситуации соответствуют правилу, согласно которому вихрь не может образовываться над рельефом (в частности, проявляться до поверхности), если скорость водного потока превышает некоторое критическое значение $R_o > R_{oc} = 2.5 \cdot 10^{-3}$. В этой ситуации наблюдается ослабление захватывающих свойств рельефа.

Наличие свободных вихревых пятен (как циклонических, так и антициклонических), переносимых потоком в Кипрскую вихревую систему, являлось еще одним фактором изменчивости структуры фонового потока. Применение МКД позволило провести серию численных экспериментов (4) по взаимодействию стационарных топографических вихрей с набегающими с потоком

вихревыми пятнами. Вихревые пятна (свободные океанские вихри) либо увеличивали горизонтальные размеры *Кипрской вихревой системы* (при их взаимодействии и слиянии друг с другом вихрей одного знака), либо подавляли и даже устраняли топографические вихри (последнее относилось лишь к циклону).

Ядра вихревых пятен, прямо набегающие на структуру «впадина-гора», обычно захватывались рельефом. Это было более выражено для пятен, расположенных в среднем слое.

Применение в работе численной трехслойной квазигеострофической модели углубило понимание механизмов, ответственных за генерацию Кипрского вихря. Показано, что взаимодействие восточного потока, частично приписываемого течению ММЖ, с местным рельефом при определенных интенсивностях и углах атаки входящего потока приводит к генерации *Кипрской вихревой системы*.

Наличие определенной вертикальной стратификации плотности также показало свою важную роль в формировании антициклон-циклона как на поверхности, так и в глубине моря. Из сравнений решений задачи о Кипрском вихре в однородном и стратифицированном случаях выявлена роль стратификации вод Левантийского бассейна. В однородной жидкости формирование Кипрского вихря, наблюдаемых размеров (около 100 км в диаметре), невозможно. Стратификация ответственна за возникновение и эволюцию мезомасштабных вихрей: вихри сужаются к поверхности океана, представляя собой усеченные конусы Тейлора-Хогга, и значительно смещаются в западном направлении. Смещения центра Кипрского вихря зафиксированы во многих исследованиях (Brenner et al. 1991, Zodiatis et al. 2005) и подтверждены в данной работе.

Исследования вертикальных движений в области топографического Кипрского вихря, в частности анализ спиральности \mathcal{H} в задаче, учитывающей непрерывную стратификацию плотности, позволили подтвердить причину «теплой» природы этого вихря — утолщение слоя прогретых вод за счет даунвеллинга. Холодное пятно, наблюдаемое со спутников рядом с Кипрским вихрем, мы объясняем апвеллингом.

Лабораторные эксперименты, моделирующие топографические вихри над особенностями дна разных форм и размеров, помещенных в ёмкость с 30%-ым раствором глицерина на вращающейся платформе, позволили получить фото и видео материалы, частично подтверждающие теоретические оценки, а именно:

а) Наблюдалось формирование цилиндрического столба Тейлора над системой двух соосных цилиндров разных радиусов. Вихрь фиксировался строго над цилиндрической областью меньшего цилиндра.

б) Обнаружено образование вертикальных слоев Стюартсона над боковыми границами цилиндров. Четкая вертикальная жидкая граница обрамляла размеры вихрей.

в) Удалось установить возможность формирования антициклона над возвышенностью и циклона над впадиной для неосесимметричной топографии дна вида «впадина-гора».

г) Зафиксирован продолжительный захват горой антициклона, тогда как захват впадиной циклона оказывался непродолжительным, и вихрь сносился вниз

по течению, так как скорость течения над впадиной была больше, чем над горой. Предположительно, мы наблюдали аналогию с течением ММЖ, периодически оказывающем подавляющий эффект на формирование Кипрского топографического циклона.

На сегодняшний момент продолжают работы по экспериментальному изучению данной обширной темы, в частности, механизма топографического вихреобразования. В будущем планируется проведение лабораторных экспериментов на вращающейся установке с другими моделями топографии, а также эксперименты с двухслойной/трехслойной жидкостью. Будут продолжаться и численные МКД-эксперименты.

Текущее применение МКД к Кипрской вихревой системе может быть улучшено в будущих исследованиях путем уточнения внешнего поля скорости фонового потока или добавления уточненной топографии бассейна, включая склон Кипра и/или склон Левантийского бассейна.

Используемая трехслойная модель указывает на огромный потенциал этого метода для изучения других региональных динамических особенностей, таких как, например, циклонический круговорот Родоса в Восточном Средиземноморье.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, RSCI:

1. **Egorova V.M.** A Three-Layer Model of Hydrodynamic Processes in the Cyprus Eddy System / V.M. Egorova, M.A. Sokolovskiy, G. Zodiatis // Ocean Dynamics – 2024. – vol 74(1). – P. 19-36.
(Импакт-фактор = 2.3, Q2) (Авторский вклад: анализ литературы, обработка и подготовка данных, постановка задачи, проведение МКД-экспериментов, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка к публикации в журнале)
2. **Egorova, V.M.** The hydrodynamic theory of the Cyprus Eddy / V.M. Egorova, V.N. Zyryanov, M.A. Sokolovskiy // Ocean Dynamics – 2022. – vol 72(1). – P. 1-20.
(Импакт-фактор = 2.3, Q2) (Авторский вклад: анализ литературы, постановка задачи, написание программы аналитического решения, обработка результатов, формулирование выводов и публикация результатов в журнале)
3. **Зырянов В.Н.** Теоретическое и лабораторное моделирование бифуркации топографического вихря на вихревые торы над двухступенчатой осесимметричной возвышенностью / В.Н. Зырянов, **В.М. Егорова** // Водные ресурсы. – 2022. – 49(2). – С. 173-183.
На английском: *Theoretical and laboratory modeling of topographic vortex bifurcation on vortex tori over two-stage axisymmetric elevation / Zyryanov V.N., Egorova V.M. // Water Resources. – 2022. 49(2). – P. 173-183.*
(Импакт-фактор = 1.229, Q3) (Авторский вклад: участие в подготовке и проведении лабораторных экспериментов, обработка результатов)

Иные статьи в сборниках материалов конференций, издания которых входят в РИНЦ:

1. **Егорова В.М.**, Зырянов Д.В. Лабораторное моделирование кипрских топографических вихрей над сложным подводным препятствием при использовании 3d-технологий // Сб. статей Всероссийской научно-практической конференции «3D технологии в решении научно-практических задач». Красноярск, Изд-во ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва», 2023. С. 147-152.
2. **Егорова В.М.** Моделирование кипрских топографических вихрей над особым подводным препятствием // Материалы конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2023). Москва, Изд-во ИО РАН, 2023. Т. 2. С. 148-150.
3. **Егорова В.М.**, Соколовский М.А. Моделирование гидродинамических особенностей системы Кипрских вихрей в рамках трехслойной модели океана // Сб. материалов 13-ой международной конференции - школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах». Москва, Изд-во: ООО «ИСПО-принт», 2022. С. 98-102.
4. Зырянов В.Н., **Егорова В.М.** Топографические вихри над неосесимметричным возмущением рельефа дна // Сб. трудов Шестой международной научной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». Москва, Изд-во: ООО «ИСПО-принт», 2020. С. 97-100.
5. Зырянов В.Н., **Егорова В.М.** Вихри в стратифицированной вращающейся жидкости со сложным рельефом дна // Сб. трудов Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения». Нижний Новгород, Изд-тво: Студия Ф1, 2019. С. 144-149.
6. Зырянов В.Н., **Егорова В.М.**, Чебанова М.К. Лабораторное моделирование тороидальных топографических вихрей // Сб. Четвертой международной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». Москва, Изд-во: ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2018. С. 152-153.

Список цитируемых литературных источников:

1. Зырянов, В.Н. Теория установившихся океанических течений / В.Н. Зырянов. - Л.: Гидрометеиздат, 1985.- 248 с.
2. Зырянов, В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений / В.Н. Зырянов. - М.: ИВП РАН, 1995.- 240 с.
3. Козлов, В.Ф. Модели топографических вихрей в океане / В.Ф. Козлов. – М.: Наука, 1983а. – 200 с.
4. Козлов, В.Ф. Метод контурной динамики в модельных задачах о топографическом циклогенезе в океане / В.Ф. Козлов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1983б. – т. 19. – № 8. – С. 845-854.
5. Макаров, В.Г. Вычислительный алгоритм метода контурной динамики с изменяемой топологией исследуемых областей / В.Г. Макаров // Моделирование в механике. – 1991. – т. 5(22). – № 4. – С. 83-95.

6. Понтекорво, Т.Б. Некоторые особенности распределения гидрологических и биологических характеристик в районах банок Гавайского подводного хребта / Т.Б. Понтекорво // Изв. ТИНРО. – 1974. – т. 92. – С. 32-37.
7. Соколовский, М.А. Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики / М.А. Соколовский // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1991. – т. 27. – № 5. – С. 550-562.
8. Brenner, S. Structure and evolution of warm core eddies in the eastern Mediterranean Levantine Basin / S. Brenner // *J Geophys Res.* – 1989. – vol 94(C9). – P. 12.593-12.602.
9. Brenner, S. The mixed-layer/thermocline cycle of a persistent warm core eddy in the eastern Mediterranean / S. Brenner, Z. Rozentraub, J. Bishop, M. Krom // *Dyn Atmos Oceans.* – 1991. – vol 15(3-5). – P. 457-476.
10. Brenner, S. Long-term evolution and dynamics of a persistent warm core eddy in the Eastern Mediterranean Sea / S. Brenner // *Deep-Sea Res II.* – 1993. – vol 40. – P. 1193-1206.
11. Dritschel, D.G. Contour surgery: a topological reconnection scheme for extended integrations using contour dynamics / D.G. Dritschel // *J Comput Phys.* – 1988. – vol 77(1). – P. 240-266.
12. Golnaraghi, M. Dynamical Studies of the Eastern Mediterranean Circulation. In: P. Malanotte-Rizzoli and A.R. Robinson (eds) *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples* / M. Golnaraghi, A.R. Robinson // NATO ASI Series, Springer, Dordrecht. – 1994. – vol 419.
13. Hayes, D.R. Description of the long-lived subsurface mesoscale eddy south of Cyprus / D.R. Hayes, A. Hannides, G. Goergiou, P. Testor, H. Gildor, G. Zodiatis // 6th EGO meeting and final Symposium of the COST Action ES0904, Kiel, Germany, 2014 {hal-01139537}
14. Hayes, D.R. Operational Assimilation of glider temperature and salinity in a mesoscale flow field: Eastern Mediterranean test case / D.R. Hayes, S. Dobricic, H. Gildor // *Ocean Sci. Discuss.*, 2016. doi: 10.5194/os-2016-43
15. Hayes, D.R. Operational assimilation of glider temperature and salinity for an improved description of the Cyprus eddy / D.R. Hayes, S. Dobricic, H Gildor, A. Matsikaris // *Deep-Sea Res Part II.* – 2019. – vol 164. – P. 41-53.
16. Hecht, A. Currents, water masses, eddies, and jets in the Mediterranean Levantine Basin / A. Hecht, N. Pinardi, A.R. Robinson // *J Phys Oceanogr.* – 1998. – vol 18(10). – P. 1320-1353.
17. Hogg, N.G. On the stratified Taylor column / N.G. Hogg // *J. Fluid Mech.* – 1973. – vol 58(3). – P. 517-537.
18. Huppert, H.E. Topographically generated eddies / H.E. Huppert, K. Bryan // *Deep Sea Res.* – 1976. – vol 23(8). – P. 655-679.
19. Kokinou, E. Structural pattern recognition applied on bathymetric data from the Eratosthenes Seamount (Eastern Mediterranean, Levantine Basin) / E. Kokinou, C. Panagiotakis // *Geo-Marine Letters.* – 2018. – vol 38. – P. 527-540.
20. Mauri, E. On the variability of the circulation and water mass properties in the Eastern Levantine Sea between Sep 2016 - Aug 2017 / E. Mauri, L. Sitz, R. Gerin, PM. Poulain, D. Hayes, H. Gildor // *Water.* – 2019. – vol 11(9). – P. 1741.
21. Menna, M. On the circulation and thermohaline properties of the Eastern Mediterranean Sea / M. Menna, R. Gerin, G. Notarstefano, E. Mauri, A. Bussani, M. Pacciaroni, PM. Poulain // *Frontiers in Marine Science.* – 2021. – vol 8(671469). – P. 1-19.
22. Özsoy, E. A synthesis of Levantine Basin circulation and hydrography, 1985-1990 / E. Özsoy // *Deep-Sea Res II.* – 1993. – vol 40(6). – P. 1075-1119.
23. Pinardi, N. The physical, sedimentary and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea / N. Pinardi, E. Arneri, A. Crise, M. Ravaioli, M. Zavatarelli // *The Sea.* – 2006. – vol 14. – P. 1245-1331.
24. Taylor, G.I. Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids / G.I. Taylor // *Proc Roy Soc Lond Ser A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character.* – 1923. – vol 104(725). – P. 213-218.
25. Zabusky, N.J. Contour dynamics for Euler equations in two dimensions / N.J. Zabusky, M.H. Hughes, K.V. Roberts // *J Comput Phys.* – 1979. – vol 30(1). – P. 96-106.

26. Zodiatis, G. Variability of the Cyprus warm core Eddy during the CYCLOPS project / G. Zodiatis, P. Drakopoulos, S. Brenner, S. Groom // Deep-Sea Res. – 2005a. – vol 52(2). – P. 2897-2910.
27. Zodiatis, G. The general circulation in the SE Levantine / G. Zodiatis, I. Gertman, P-M. Poulain, M. Menna // PERSEUS Conference Proceedings: Integrated Marine Research in the Mediterranean and Black Sea, Brussels. – 2015. – P. 231-232.
28. Zodiatis, G. Twenty years of in-situ monitoring in the south-eastern Mediterranean Levantine Basin: basic elements of the thermohaline structure and of the mesoscale circulation during 1995-2015 / G. Zodiatis, S. Brenner, I. Gertman, T. Ozer, S. Simoncelli, M. Ioannou, S. Savva // Frontiers Marine Science. Climate Change impacts on Mediterranean Coastal and Transitional Areas: Assessment, Projection, and Adaptation. – 2023. – vol 9. – P. 1074504.

Егорова Виктория Михайловна

Вихревая динамика над неосесимметричной топографией дна во вращающейся стратифицированной жидкости (в приложении к Кипрскому вихрю)

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук)

Подписано в печать 14.03.2024
Формат А5. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Объем: усл. печ. л. 2.
Тираж 80 экз.
Типография «Аксиоматика»
Малая Почтовая ул., 4, стр. 1
zakaz@axiprint.ru

