

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию
Башмачникова Игоря Львовича на тему:
**«Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на
поверхности океана», представленную на соискание ученой степени
доктора географических наук по научной специальности 1.6.17.
Океанология**

Актуальность темы

Подповерхностные вихри, такие, например, как вихри «медди», представляют собой важный элемент динамики океана. Их изучение на различных этапах жизненного цикла и анализ их влияния на поверхность океана имеют большое значение для развития наших знаний о физической и биологической географии океана. Эти исследования помогают понять, как вихри формируются, эволюционируют и взаимодействуют с окружающей средой, а также как они влияют на климатические процессы, биогеохимические циклы и морские экосистемы.

Подповерхностные вихри формируются в результате сложных взаимодействий океанических течений, рельефа дна. Они представляют собой изолированные водные массы, которые сохраняют свои характеристики, в частности, повышенную температуру и соленость, на протяжении длительного времени, перемещаясь на тысячи километров. Этот процесс играет ключевую роль в формировании океанических фронтов и стратификации водных масс, что, в свою очередь, влияет на глобальную циркуляцию, включая «глобальный океанский конвейер», который является основным механизмом перераспределения тепла между экваториальными и полярными регионами. Кроме того, эти вихри могут влиять на распределение растворенного кислорода и углерода, что имеет важное значение для понимания глобального углеродного цикла и процессов изменения кислотно-щелочного баланса океана.

Хотя подповерхностные вихри формируются на глубине, их влияние может проявляться на поверхности океана. Это проявляется в виде аномалий уровня моря, которые могут быть зафиксированы с помощью спутниковой альтиметрии. Кроме того, подповерхностные вихри могут вызывать изменения температуры поверхности океана, что влияет на теплообмен между океаном и атмосферой. Еще одним важным проявлением вихрей на поверхности является их влияние на биологические и химические процессы. Например, подповерхностные вихри могут вызывать апвеллинг — подъем глубинных вод, богатых питательными веществами, к поверхности. Это стимулирует рост фитопланктона, что может быть зафиксировано с помощью спутниковых данных о цвете океана.

Проявление подповерхностных вихрей на поверхности океана позволяет широко использовать спутниковые данные, так как они предоставляют ряд

уникальных преимуществ для изучения подповерхностных вихрей. Во-первых, они обеспечивают глобальный охват, позволяя наблюдать за океаном на значительных масштабах. Во-вторых, современные спутниковые системы, работающие уже несколько десятилетий, обеспечивают высокое временное и пространственное разрешение, что позволяет накапливать архивы и детально отслеживать динамику вихрей. В-третьих, спутниковые данные включают измерения уровня моря, температуры поверхности океана, цвета океана и других параметров, что делает возможным комплексное изучение подповерхностных вихрей. Однако это требует совершенствования существующих способов комплексного анализа спутниковых данных.

Практическое значение исследований подповерхностных вихрей также велико. Понимание их динамики позволяет улучшить прогнозирование океанических течений, что важно для навигации и судоходства. Кроме того, вихри влияют на распределение промысловых видов рыб, что делает их изучение актуальным для рыболовства. Наконец, подповерхностные вихри могут переносить загрязняющие вещества и микроорганизмы, что требует их учета при оценке экологического состояния океана.

Таким образом, изучение изменений характеристик подповерхностных вихрей на различных этапах их жизненного цикла и анализ их проявления на поверхности океана являются важными задачами современной океанологии. Эти исследования позволяют не только углубить понимание динамики океана, но и улучшить климатические модели, разработать методы мониторинга и приблизиться к решению практических задач навигации и рыболовства. Стоит отметить, что в современных условиях глобального изменения климата и растущего антропогенного воздействия на океан такие исследования становятся особенно актуальными.

Оценка структуры и содержания работы

Текст диссертации состоит из введения, семи основных глав и заключения.

В первой главе представлена классификация вихрей, выделен конкретный класс вихрей, который исследуется в работе. Описаны основные аспекты динамики вихрей, которые используются в дальнейшем анализе. Также даны краткие характеристики изучаемых типов подповерхностных вихрей: «медди» в субтропической Атлантике и Лофотенского вихря в Северо-Европейском бассейне. Кроме того, приведен обзор подходов к изучению проявлений подповерхностных вихрей на поверхности океана.

Глава производит благоприятное впечатление. Она написана четко и последовательно.

Во второй главе описаны данные и методы анализа, используемые в работе. Рассмотрены методы выделения вихрей на основе данных *in situ*, спутниковых данных и расчетов гидродинамических моделей. Проведено сравнение характеристик вихрей, полученных из разных источников данных, и показаны ограничения каждого типа данных в идентификации и описании вихрей.

Текст главы хорошо структурирован, представленные методики изложены лаконично и очень четко. Подробно отражены особенности получаемой информации в зависимости от типа используемых данных. Несмотря на то, что глава носит преимущественно методический характер, она показывает хороший уровень проработки материала соискателем.

Третья глава посвящена статистическому анализу трехмерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей в Норвежском и Гренландском морях на основе спутниковых и натуральных наблюдений. Описаны особенности пространственного распределения вихрей, включая их количество на единицу площади, радиус, вертикальную мощность, аномалии температуры в ядре, скорость вращения и перемещения. Показано, что вихри в этих морях существенно различаются по всем перечисленным характеристикам. На основе натуральных данных продемонстрировано, что слияние вихрей является важной особенностью их эволюции вблизи районов интенсивной генерации. Также даны оценки потоков тепла, переносимых вихрями на рассматриваемой акватории Северной Атлантики.

Глава является одной из ключевых в данной работе. Она написана четко и последовательно. Особенно интересны выводы об увеличении радиуса вихрей вдоль пути их распространения от Лофотенских островов до северо-западной части Лофотенского бассейна и о том, что вихри могут извлекать до трети тепла, приносимого восточной ветвью Норвежского течения в бассейн Северного Ледовитого океана.

В четвертой главе уточнены пути распространения средиземноморских вод в Атлантике на основе анализа климатологических данных. Используя метод оптимального мультипараметрического анализа, получено трехмерное распределение процентного содержания средиземноморской водной массы. Выделены основные пути распространения ее верхнего и нижнего ядер. Показано, что течения способствуют распространению средиземноморской водной массы только на начальных этапах, а дальше ключевую роль играют «медди». Получены статистические данные об изменчивости характеристик «медди» в зависимости от расстояния от мест их генерации. Они разделены на две группы — северные и южные — с разными характеристиками и путями движения. Описаны особенности их жизненных циклов, включая слияние и разрушение.

В целом глава приводит благоприятное впечатление. Хотя несколько смущает, что часть использованных методик приведена в приложении к главе, а не заранее, что несколько затрудняет восприятие текста. Наиболее интересны выводы о образовании соленого языка средиземноморских вод на расстояниях более 600 км от Гибралтарского пролива за счёт влияния подповерхностных вихрей, а также то что в Иберийском бассейне в динамике «медди» преобладает слияние ядер, что приводит к росту интегрального количества соли их ядер.

Пятая глава посвящена механизмам диссипации и слияния вихрей на примере Лофотенского вихря. Показано, что диссипация вихрей в океане может значительно отличаться от предсказаний квазигеострофических

моделей. Объяснена высокая устойчивость Лофотенского вихря, связанная с особенностями донной топографии и взаимодействием с Норвежским течением. Также исследована роль экрана потенциальной завихренности и внешних деформаций в слиянии вихрей.

Глава, как и предыдущие, является одной из ключевых в данной работе. Наиболее интересен вывод том, что устойчивость Лофонтенского вихря существенно зависит от небольших особенностей топографии котловины.

В шестой главе систематизированы натурные исследования проявлений «медди» на поверхности моря. На основе анализа данных спутниковой альтиметрии AVISO показано, что «медди», несмотря на глубокое залегание, часто формируют заметные аномалии уровня моря, которые можно отслеживать в течение многих месяцев. Получены теоретические оценки, связывающие интенсивность сигналов на поверхности с характеристиками ядер «медди».

Представленные в главе результаты являются самыми важными в исследовании с практической точки зрения, так как они показывают подходы по идентификации сигналов подповерхностных вихрей на поверхности моря, чем открывают новые возможности для изучения динамики океана.

Седьмая глава посвящена механизмам формирования аномалий температуры поверхности океана над подповерхностными антициклонами. Показано, что в отличие от поверхностных антициклонов, подповерхностные вихри вызывают отрицательные аномалии на поверхности океана. Описаны механизмы формирования этих аномалий, связанных с подъемом изопикн над ядром вихря, а также представлен возможный механизм агеострофической циркуляции, поддерживающий этот подъем.

В целом глава приводит благоприятное впечатление. Наиболее интересен вывод о том, что усиление отрицательной аномалии температуры поверхности океана происходит за счет захвата холодных вод и проникновения их в центральную часть поверхностного сигнала подповерхностного вихря и «обертывания» теплых вод вокруг холодного центра.

В заключении подведены итоги исследования, выполнен совместный анализ результатов, полученных в других главах.

В целом диссертационная работа показывает умение автора выполнить весьма обширный комплекс научных исследований с использованием немалого массива разнородных данных, его обработку и анализ с использованием всех доступных методических подходов. Структурно диссертационное исследование выстроено логично и последовательно. Все разделы очень хорошо проработаны.

Степень обоснованности положений и выводов

Диссертационная работа показывает способность автора выполнить значительное и разноплановое научное исследование от сбора и синтеза данных до их обработки с применением принципиально различных методов анализа.

Научные результаты диссертации достаточно четко обоснованы и аргументированы, хотя отдельные их части требуют дополнительных пояснений. Обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации, доказывается использованием обширного объема разнородных массивов данных. Выводы логически вытекают из материалов исследований и отражают поставленные задачи.

Формулировки защищаемых положений в полной мере отражают результаты работы. При этом тезисы о научной новизне работы и формулировки основных результатов в заключении диссертационной работы раскрывают и дополняют понимание защищаемых положений.

Достоверность и новизна результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы оригинальны, четко обоснованы и доказаны. Достоверность полученных результатов обеспечивается проведением всестороннего и многоаспектного анализа значительных объемов современных данных, включающих обширные массивы натуральных наблюдений, спутниковых измерений и результатов численного моделирования. Важным этапом исследования являлось объективное и детальное сопоставление этих данных, что позволяет оценить возможные погрешности и повысить достоверность выводов. Кроме того, надежность результатов подтверждается высокой степенью согласованности выводов, полученных при изучении различных типов подповерхностных вихревых структур, которые характеризуются разнообразием глубины залегания ядра и широким географическим распространением в различных широтных зонах Северной Атлантики. Такой комплексный подход, основанный на интеграции данных из разных источников и их тщательной верификации, позволяет обеспечить высокий уровень достоверности и научной обоснованности полученных результатов. Анализ данных выполнялся при помощи методов анализа, не раз апробированных другими исследователями.

Автором проведен статистический анализ изменчивости характеристик «медди» в зависимости от расстояния от мест их образования, выявлены малоизученные аспекты их жизненного цикла, включая роль слияний, струйных течений и топографии в диссипации; на примере Лофотенского вихря изучены процессы диссипации и регенерации подповерхностных антициклонов, различия в восстановлении энергии при конвекции и слияниях, а также условия для слияния вихрей. Показано, что генерация филаментов способствует устойчивости ядра, а мелкие топографические особенности влияют на стабильность вихря; систематизирована изменчивость проявлений подповерхностных вихрей с глубоким ядром на поверхности моря, предложен механизм формирования их проявлений; разработан метод идентификации подповерхностных антициклонов путем комплексирования данных спутниковой альтиметрии и температуры поверхности океана, описаны возможные механизмы формирования

отрицательных аномалий температуры вод над подповерхностными циклонами.

Значительный личный вклад автора в исследование, так же как достоверность и новизна научных результатов работы, подтверждаются двадцатью тремя публикациями в ведущих рецензируемых журналах (в том числе 18 статей, индексируемых базами Scopus и Web of Science уровня Q1), а также значительным (более 50) числом выступлений на международных и всероссийских конференциях (материалы которых так же были опубликованы).

В качестве замечаний можно отметить следующее:

- Требуется пояснить фразу в описании таблицы 2.1. «Профили высокого и среднего разрешения были приведены к 25-м вертикальному разрешению.»
- Желательно прокомментировать вклад приближения, принятого при описании фоновых характеристик вод, использовавшихся затем для оценки характеристик «медди». В частности: «Климатические карты строились в предположении отсутствия сильных межгодовых колебаний характеристик воды ниже верхнего 100-м слоя за период анализа (с 1950г.)». Тогда как, например, согласно (Desbruyères, D. G., E. L. McDonagh, B. A. King, F. K. Garry, A. T. Blaker, B. I. Moat, and H. Mercier (2014), Full-depth temperature trends in the northeastern Atlantic through the early 21st century, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7971–7979) промежуточные и глубокие слои вод Атлантического океана испытывали в рассматриваемый период значимую межгодовую трансформацию.
- Целесообразно было бы более подробно пояснить выбор базовой температуры (-1.8°C), задаваемой при оценке переноса количества тепла вихрем, которая приведена в формуле 3.1.
- Желательно развернуто представить методику определения значений относительной роли (веса) уравнений характеристик в системе (4.11).
- Целесообразно было бы более четко классифицировать причины значительного разброса наблюдаемых и предсказанных характеристик в сигналах поверхностных проявлений «медди».

Отмеченные несколько замечаний не снижают крайне благоприятного впечатления от проведенного обширного и интересного исследования.

Заключение

Диссертация Башмачникова Игоря Львовича на тему: «Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Башмачников Игорь Львович заслуживает присуждения ученой степени доктора

географических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология.
Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не
установлены.

Член диссертационного совета:

доктор географических наук, доцент, профессор кафедры океанологии
Санкт-Петербургского государственного университета

20.01.2025



Зимин Алексей Вадимович