

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 диссертационной работы Башмачникова Игоря Львовича связана с исследованием подповерхностных вихрей в Северной Атлантике, где они вносят существенный вклад в структуру и динамику вод, перенос массы и тепла. Они играют важную роль в обмене энергией между движениями различных масштабов и конечной диссипации энергии движений в океане в тепло. Проблема заключается в том, что подповерхностные вихри не только трудно исследовать, но и обнаруживать стандартными методами. Поэтому сегодня многие исследования направлены на изучение незначительных проявлений подповерхностных вихрей на поверхности океана, чтобы их можно было обнаруживать и изучать различными дистанционными методами. Этой актуальной теме современной океанологии и посвящена диссертация.

Цели и задачи диссертационной работы. Основной целью работы является оценка изменений характеристик подповерхностных вихрей на различных этапах их жизненного цикла и выявление особенностей проявления подповерхностных вихрей на поверхности океана. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка алгоритмов выделения подповерхностных вихрей, определения их характеристик и траекторий движения по натурным данным, включая вертикальные зондирования и данные поплавков RAFOS и ARGO.
2. Выявление путей распространения и жизненных циклов подповерхностных вихрей средиземноморских вод (медди) в Атлантическом океане, включая особенности процессов генерации, эволюции и диссипации вихрей.
3. Исследование механизмов диссипации и регенерации подповерхностных вихрей в океане, а также механизмов сохранения подповерхностными вихрями устойчивости к внешним возмущениям на примере квазипостоянного Лофотенского вихря Норвежского моря.
4. Анализ особенностей проявления подповерхностных вихрей на поверхности океана по данным спутниковой альтиметрии и температуры поверхности океана (ТПО), выявление механизмов формирования подповерхностными вихрями аномалий на поверхности моря и возможности идентификации подповерхностных вихрей по спутниковым данным.
5. Разработка теории проявления подповерхностных вихрей на поверхности моря, оценка возможности выявления основных аспектов жизненного цикла подповерхностных вихрей по спутниковым данным.

Теоретическое значение работы. Полученные результаты позволяют продвинуться в понимании механизмов генерации и диссипации, структуры, динамики, устойчивости и продолжительности жизни подповерхностных вихрей в Северной Атлантике.

Практическое значение полученных результатов. Полученные результаты, в частности, позволяют с большей вероятностью определять положение подповерхностных вихрей в Северной Атлантике, а также их пространственные характеристики, что имеет важное значение для более точных расчетов потоков массы, тепла, соли и биогенов. Более точные оценки содержания биогенов в вихрях важны для оценок биологической продуктивности вод океана и рыболовства в конкретных промысловых районах Северной Атлантики.

Достоверность и обоснованность основных результатов. Обоснованность полученных результатов определяется комплексным анализом больших объемов современных массивов натуральных, спутниковых и модельных данных, их объективным и детальным сопоставлением, а также согласованностью результатов исследований для различных типов подповерхностных вихрей с разной глубиной ядра и в разных широтных зонах. Достоверность полученных результатов определяется большим количеством публикаций автора в рецензируемых высокорейтинговых журналах (24 работы, входящие в базы данных Scopus и Web of Science).

Научная новизна основных результатов. Среди полученных результатов следует выделить следующие:

- (1) Разработана методология, которая позволяет непрерывно отслеживать сигналы меди на поверхности моря за период от нескольких месяцев до 2х лет. Показано, что сигнал меди на поверхности моря весьма устойчив, но может прерываться в периоды взаимодействия меди с другими интенсивными динамическими структурами или вблизи подводных гор.
- (2) Представлены теоретические оценки интенсивности сигнала меди на поверхности моря. Показано, что эта интенсивность прямо пропорционально радиусу ядра меди и параметру Кориолиса и обратно пропорциональна глубине ядра меди и частоте плавучести верхнего слоя океана.
- (3) Наблюдения доплеровским измерителем течений показали, что скорость течения на поверхности моря в сигнале, генерируемом движущимся медди, сравнима со скоростью Азорского течения. Показано, что в отличие от теплого сигнала в температуре поверхности океана у поверхностных антициклонов, над медди доминировала отрицательная аномалия ТПО.
- (4) Показано, что медди с динамическими радиусами 30 км и более всегда будут видны в данных альтиметрии AVISO, тогда как при радиусе 20 км на поверхности моря будут видны только наиболее интенсивные медди с относительно неглубоким ядром, а медди радиуса 10 км, как правило, не могут быть выявлены в данных AVISO.
- (5) В данных натуральных наблюдений выделено 241 медди и 236 отрезков траекторий меди для дальнейшего анализа. Показано, что медди движутся вдоль четырех основных маршрутов.
- (6) Данные спутниковой альтиметрии AVISO в 1.5-2 раза превышают радиусы вихрей и в 1.5-2 раза занижают максимальные азимутальные скорости вихрей. Данные AVISO позволяют достоверно оценить пространственную изменчивость различных

характеристик поверхностных вихрей и достоверно выявить характер распространения вихрей.

- (7) Средние поверхностные течения способны существенно интенсифицировать поверхностные динамические проявления подповерхностных вихрей. Усиление к западу скоростей поверхностных течений в субтропической Атлантике объясняет западную интенсификацию сигналов на поверхности моря над вихрями средиземноморских вод (медди).
- (8) Показано, что мезомасштабные вихри оказывают существенное влияние на перераспределение океанического тепла, извлекая и рассеивая по Лофотенскому бассейну около 60 ТВт, что составляет более 30% тепла, приносимого в регион восточной ветвью Норвежского течения.

Публикации и личный вклад автора, апробация работы. Автором диссертации опубликовано 24 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы данных Scopus, Web of Science (WoS) и/или Russian Science Citation Index (RSCI), включая 18 статей в журналах уровня Q1. Работа апробирована на многочисленных российских и международных конференциях. По результатам диссертационного исследования было сделано 53 доклада на 7 всероссийских и 46 международных научных конференциях.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из Введения, семи глав, Заключения, списка литературы. Общий объем диссертации – 333 страниц, включая 127 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 569 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во Введении представлены актуальность, цели и задачи исследования, теоретическое и практическое значение работы, достоверность и обоснованность основных результатов, апробация работы, публикации и личный вклад автора, основные научные результаты, положения, выносимые на защиту.

В Первой главе приведена классификация вихрей, выделен класс исследуемых вихрей; описаны основные аспекты динамики вихрей, используемые в дальнейшем ходе работы; даны краткие характеристики исследуемых типов подповерхностных вихрей в субтропической Атлантике (медди) и Северо-Европейского бассейна (Лофотенский вихрь); дан краткий обзор подходов к исследованиям проявлений подповерхностных вихрей на поверхности океана.

Во Второй главе описываются используемые в работе данные и методы анализа. Описаны применявшиеся методы выделения вихрей по данным in-situ, спутниковым данным и данным гидродинамических моделей; дана сравнительная характеристика вихрей, выделяемых по различным типам данных, показаны ограничения разных типов данных в идентификации и воспроизведении характеристик вихрей.

В Третьей главе приводится статистика трехмерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей Норвежского и Гренландского морей на базе спутниковых и натурных наблюдений. Описаны особенности пространственного распределения по акватории основных характеристики вихрей (плотность распределения, радиус, толщина, аномалия ТПО, скорость вращения, скорость перемещения).

Четвертая глава посвящена распространению средиземноморских вод в Атлантике, впервые полученному на основе объективного анализа климатологических данных и представляющий собой трехмерное распределение процентного содержания средиземноморской водной массы (СВМ), полученное методом оптимального мультипараметрического анализа. Выделены пути преимущественного распространения верхнего и нижнего ядер СВМ. Получены статистические данные об изменчивости характеристик медди с расстоянием от районов их генерации; уточнены основные пути движения медди.

В Пятой главе на примере квазипостоянного Лофотенского вихря, описываются механизмы диссипации и слияния вихрей. Показано, что диссипация вихрей в океане может существенно отличаться от результатов квазигеострофических моделей, используемых для оценки степени устойчивости вихрей. Показано, что аномально высокая устойчивость Лофотенского вихря связана с небольшой особенностью донной топографии, которая, в сочетании со средней циркуляцией, формируемой набегающим Норвежским течением, приводит к кратному росту устойчивости вихря.

В Шестой главе проведена систематизация натуральных исследований динамических проявлений медди на поверхности моря путем совместного анализа характеристик выявленных медди и формируемых ими аномалий уровня моря в данных спутниковой альтиметрии AVISO. Показано, что, несмотря на глубокое ядро (500-1200 м), медди часто формируют выраженный сигнал на поверхности моря, который сравним по интенсивности с сигналами поверхностных антициклонов в районе исследования и может непрерывно отслеживаться в течении многих месяцев.

Седьмая глава посвящена исследованию особенностей и механизмов формирования аномалий ТПО над подповерхностными антициклонами. Показано, что, в отличие от поверхностных антициклонов, подповерхностные антициклоны характеризуются отрицательными аномалиями ТПО. Выявлено два механизма формирования этих аномалий, оба являющихся следствием подъема изопикн над ядром подповерхностного антициклона.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

К работе имеется ряд замечаний:

- (1) Название диссертации «Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана» претендует на глобальное исследование, однако, в диссертации речь идет о подповерхностных вихрях только в Северной Атлантике (медди) и в Норвежском море (Лофотенский вихрь), и никакие другие районы Мирового океана и никакие другие подповерхностные вихри не рассматриваются. Кроме того, с учетом того, что диссертация защищается на географические науки, название диссертации следовало бы ограничить именно этим районом. На стр. 9 автор сам пишет, что «Районами исследования являются субтропическая северо-восточная Атлантика и Лофотенская котловина Норвежского моря.»

- (2) В диссертации написано, что она содержит 8 глав, причем восьмая глава – это Заключение. Следовало бы придерживаться общепринятого стандарта и указать, что диссертация состоит из 7 глав, Введение и Заключения.
- (3) Стр. 6 – *«Как правило, вихри имеют округлую форму, которая минимизирует площадь поверхности при фиксированном объеме ядра, а значит минимизирует площадь контакта вихря с окружающей средой, что снижает вероятность его разрушения.»* Это очень странное утверждение, поскольку идеальных круглых вихрей в океане нет, в той или иной степени они все эллиптические по разным причинам. Во-вторых, соотношение вертикального и горизонтального размеров вихрей в океане примерно 1 к 100, поэтому вихрь – это фактически вращающийся тонкий диск и его наибольшая зона контакта это верхняя или нижняя поверхность, которыми вихрь контактирует с атмосферой (в случае поверхностных вихрей), дном (в случае придонных вихрей) или выше- или нижележащими слоями (в случае внутритермоклинных вихрей).
- (4) Стр. 7 – *«Для исследования мезомасштабных вихрей по спутниковым данным подавляющее большинство исследователей используют карты спутниковой альтиметрии AVISO».* Это неверное утверждение, поскольку исторически большинство исследователей использовали тепловые и оптические снимки, а также радиолокационные изображения задолго до появления AVISO.
- (5) Стр. 7 – *«Расстояние между соседними треками данных может достигать 100 км,.....».* Это сильно заниженное значение, поскольку у экватора расстояние между соседними треками некоторых альтиметров (например, спутников Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3) составляет 320 км.
- (6) Стр. 6-9 – *«Актуальность темы исследования и степень ее разработанности».* Большая часть текста не содержит вопросов актуальности проведенного исследования, а степень разработки не касается вопросов проявления подповерхностных вихрей на поверхности океана (см название диссертации).
- (7) Стр. 9. – *«В данных наблюдений, помимо поверхностных вихрей, также были выделены многочисленные подповерхностные вихри, ядра которых могут находиться на значительной глубине (Костяной и Белкин, 1989; Richardson et al., 1991; Lozier, 2010).»* Костяной и Белкин, 1989 – нет такой работы, это должна быть Kostianoy, Belkin, 1989 (если мы говорим о первом обзоре ВТВ в Мировом океане на английском языке) и Белкин, Емельянов, Костяной, Федоров (1986), если мы говорим о первом обзоре ВТВ в Мировом океане на русском языке.
- (8) Стр. 9 – *«В настоящее время динамика подповерхностных вихрей изучается, в основном, по данным численных моделей и в теоретических работах».* Автором ничего не сказано об изучении подповерхностных вихрей в лабораторных условиях.
- (9) Стр. 9 – *«Выводы работы имеют общий характер и позволяют описывать особенности эволюции характеристик подповерхностных вихрей в любой области Мирового океана.»* Это слишком сильное заявление, не подтвержденное ничем, поскольку автор не исследовал другие районы Мирового океана. Во многих районах Мирового океана есть свои особенности, которые могут влиять на

механизмы генерации и диссипации, структуру, динамику, устойчивость и продолжительность жизни подповерхностных вихрей (например, стратификация, ледовый покров, топография дна и пр).


- (10) Стр. 21-25, «Основные научные результаты» - Представлено 24 результата, многие из которых весьма частные. Результаты приведены в хаотичном порядке, логики в их изложении нет. Например, постоянно чередуются результаты про Медди и Лофотенский вихрь. Эта же проблема существует и в положениях, выносимых на защиту. Кроме того, многие результаты имеют степень участия автора всего 20-40%, поэтому непонятно, зачем было их приводить.
- (11) В Основных результатах (10) указано, что «На расстоянии менее 600 км от берега ядра медди регулярно сливаются.» Слияние вихрей в океане – это достаточно редкое явление, которое инструментальными методами фиксировалось не так много раз. На основании каких фактов (совместных in-situ измерений) делается такое утверждение?
- (12) Стр. 25. Положение, выносимое на защиту (1) – «Выделено две группы медди, северные и южные, которые приобретают свои различия во время их генерации.» - Разделение Медди на южные и северные, а также их разные пути распространения впервые было показано в работе Белкин И.М., Костяной А.Г. Средиземноморские линзы в северной части Атлантического океана. - В кн.: Гидрофизические исследования по программе «Мезополигон». М.: Наука, 1988. С.110-123. Далее указано, что «Южные медди, по сравнению с северными, более компактны.....». Это противоречит тому факту, что радиус деформации Россби с увеличением широты места уменьшается, именно поэтому размеры вихрей, например, в тропиках больше, чем в Арктике.
- (13) В положении, выносимом на защиту (4) написано, что «На примере медди, показано, что сигнал подповерхностного вихря с глубоким ядром на поверхности моря представляет собой самостоятельный антициклон, формируемый вследствие сохранения потенциальной завихренности водами набегающего потока.» Если это «самостоятельный антициклон», то он не связан с медди? Тогда он движется и эволюционирует на поверхности океана самостоятельно, независимо от медди? Тогда как по этому «самостоятельному» антициклону можно судить о характеристиках и движении медди?
- (14) Положение, выносимое на защиту (5): «Показано, что сигналы подповерхностных антициклонических вихрей проявляются в поле температуры поверхности океана (ТПО) как холодные аномалии.» без упоминания района исследования и конкретных вихрей звучит как абсолютное утверждение, верное для любых подповерхностных вихрей в любом районе Мирового океана. Это не так, поскольку аномалии ТПО в центрах поверхностных и подповерхностных вихрей зависят от вертикальной стратификации, вовлечения вод с периферии и других процессов. Есть масса примеров, когда в центрах поверхностных антициклонических вихрей присутствует не положительная, а отрицательная аномалия ТПО при определенных условиях.

- (15) В Третьей главе приводится статистика трехмерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей Норвежского и Гренландского морей на базе спутниковых и натуральных наблюдений. Однако, полученные результаты по этой главе не вошли ни в основные результаты работы, ни в положения, выносимые на защиту. Более того, они не относятся к теме диссертации (см. название диссертации).
- (16) Стр. 45 – На «Рис. 1.7. Разрезы (а) солёности и (b) температуры воды (С).....» вторым рисунком приведена не температура, а снова солёность.
- (17) Стр. 49 – Автор, описывая метод спутниковой альтиметрии, пишет: «Конечным результатом, после введения многочисленных поправок, является высота уровня моря относительно геоида.» Строго говоря, конечным результатом метода спутниковой альтиметрии является аномалия уровня (Sea Level Anomaly), а не абсолютный уровень моря, который получается путем суперпозиции аномалии уровня и средней динамической топографии, которая берется из альтиметрических данных либо модельных расчетов, либо морских реанализов. В этом заключается одна из важнейших проблем спутниковой альтиметрии, которая дает ошибки в пространственно-временных характеристиках вихрей. В базе данных AVISO представлена следующая информация: аномалии уровня (Sea Level Anomalies), абсолютная динамическая топография (Absolute Dynamic Topographies) и геострофические скорости (Geostrophic velocities). К сожалению, автор не указал, какие конкретные данные он использовал в работе.
- (18) Стр 105 – «Вихри в Норвежском и Гренландском морях выделялись с по данным спутниковой альтиметрии AVISO18 (см. методы в разделе 2.3.3). С 1993 по 2018 гг. в исследуемом районе было выделено более 900 000 мезомасштабных вихрей.» Это количество соответствует примерно 100 вихрям в день ежедневно. Хватит ли механизмов генерации, например, длины неустойчивых фронтальных зон для генерации такого количества вихрей в этих морях?
- (19) Стр. 133 – «Медди формируются в результате неустойчивости MUC. Предполагаются три основных механизма формирования медди: бароклинная неустойчивость MUC (McWilliams, 1985; Cherubin et al., 2007), баротропная неустойчивость MUC и отрыв сдвигового придонного пограничного слоя MUC у мысов или каньонов (D'Asaro, 1988; Aiki and Yamagata, 2004).» Не упомянут четвертый механизм – пульсации расхода течения через пролив, который работает не только в Гибралтаре, но и в других районах (проливах) Мирового океана.
- (20) Стр 276 «7.1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА НАД МЕДДИ». Примеры прямого образования холодных аномалий ТПО над внутритермоклинными вихрями на Канарском апвеллинге приведены в работе Костяной А.Г., Родионов В.Б. Об образовании внутритермоклинных вихрей на Канарском апвеллинге. Океанология, 1986, Т.26, N 6, С.892-895.

Несмотря на приведенные замечания, с учётом всего вышесказанного полагаю, что диссертация Башмачникова Игоря Львовича на тему: «Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана» соответствует специальности 1.6.17. – «Океанология». Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные результаты, использование которых вносит значительный вклад в развитие страны. Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено; диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Лаборатории
экспериментальной физики океана
Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН
16 января 2025 г.

 А.Г. Костяной

Верно:

Зав. канцелярией

