

ОТЗЫВ

члена диссертационного Совета на диссертацию Башмачникова Игоря Львовича «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 диссертации.

Диссертационное исследование И.Л. Башмачникова посвящено не достаточно изученным в океанологии сильно нелинейным структурам океана, переносящим как энергию, так и массу - подповерхностным мезомасштабным вихрям. Эти мезомасштабные вихри оказывают существенное влияние на формирование крупномасштабной циркуляции океана. Большинство исследований подповерхностных вихрей в океане выполняется по данным моделирования, но в рецензируемой диссертационной работе закономерности подповерхностных вихрей исследуются по данным натурных наблюдений и по спутниковым данным, и с привлечением результатов численного моделирования. Полученные автором современные представления о закономерностях подповерхностных вихрей представляют интерес для совершенствования существующих вихреразрешающих математических моделей динамики океана. Особый интерес имеют представления о вихревой динамике по данным *in situ* измерений и спутниковым данным. Несомненно, актуальными являются сведения о статистических характеристиках вихревых средиземноморских образований вод в Атлантическом океане, которые позволили разработать автору теорию динамических сигналов подповерхностных вихрей на поверхности океана.

Практическая значимость работ.

Полученные в работе теоретические соотношения, оцененные на натурном материале позволяют связать характеристики ядер подповерхностных вихрей с их сигналами на поверхности моря, что дает возможность изучения подповерхностных вихрей с помощью спутниковых методов. Эти результаты представляют интерес для калибрации и совершенствования алгоритмов усвоения мезомасштабных вихрей в современных численных моделях высокого разрешения, что дает возможность уточнения оценки вклада океана в изменения климата.

Цель диссертационной работы - определить изменения характеристик подповерхностных вихрей на различных этапах их жизненного цикла, разработать алгоритмы выделения вихрей, обосновать возможность надежного выявления особенностей проявления этих вихрей на поверхности океана.

Защищаемые положения.

Выделение двух групп северных и южных вихрей (медди), их особенности, различия и генерации и разрушения; обоснование того, что слияние вихрей в отличие от дифференцированной конвекции, приводят к значительному росту интегральной кинетической энергии вихря, а устойчивость антициклонального Лофотенского вихря может существенным образом зависеть от небольших особенностей топографии;

Выведенные теоретические зависимости позволили объяснить широтную и сезонную изменчивость интенсивности поверхностных сигналов меди изменчивостью отношения частоты плавучести верхнего слоя океана к параметру Кориолиса. Помимо выделенных в теории факторов, интенсивность поверхностного сигнала меди зависит от скорости среднего течения верхнего слоя океана; представления о том, что сигналы подповерхностных антициклонических вихрей проявляются в поле температуры поверхности океана (ТПО) как холодные аномалии и предложенная схема вторичной агеострофической циркуляции, которая поддерживает холодные аномалии ТПО над антициклоном с приповерхностным ядром.

Разработка алгоритмов выделения подповерхностных вихрей, определения их характеристик и траекторий движения по натурным данным, включая вертикальные.

Выявление путей распространения и жизненных циклов подповерхностных вихрей средиземноморских вод в Атлантическом океане, особенности процессов генерации, эволюции и диссипации вихрей.

Обоснование механизмов диссипации и регенерации подповерхностных вихрей в изучаемом районе океан.

Определение механизмов формирования подповерхностными вихрями аномалий на поверхности моря и возможности идентификации подповерхностных вихрей по спутниковым данным. И разработку теории проявления подповерхностных вихрей на поверхности моря по спутниковым данным.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов.

Автором исследования впервые оценена роль слияний в изменчивости характеристик вихрей вблизи районов их генерации для двух групп подповерхностных вихрей Атлантического океана. Для подповерхностного Лофотенского вихря получены статистические характеристики изменения кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе слияния и дифференцированной конвекции. Предложен способ идентификации подповерхностных антициклонов по спутниковым данным путем комбинирования данных альтиметрии и ТПО. Впервые выявлены систематические различия в проявлении поверхностных и подповерхностных антициклонических вихрей в поле температуры поверхности океана описаны механизмы формирования этих аномалий.

Публикации по диссертации. По результатам диссертационной работы 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. За последние 10 лет по теме диссертации было опубликовано 11 статей с ведущим участием автора, в т.ч. 10 в журналах уровня Q1 или Q2.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения и 8 глав, содержит 332 страницы и включает 127 иллюстраций и 14 таблиц, а также список литературы из 569 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении. Представлена актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Показано, что изучаемые вихревые образования играют важнейшую роль в обмене энергией и энтропией между движениями различных масштабов, конечному переходу энергии океанических движений в тепло. Дано краткое обоснование того, что предлагаемое исследование необходимо для совершенствования существующих математических моделей динамики океана. Представлена необходимость внедрения спутниковых методов изучения океана исследования поверхностных вихрей в океане. Показано, что статистические характеристики вихревой динамики океана на настоящий момент изучены недостаточно. Автор отмечает, что, несмотря на то, что данное исследование опирается на изучение вихревых образований только двух регионов Мирового океана, оно охватывает динамику разнообразных вихрей для различных широт и поэтому выводы работы имеют общий характер и позволяют описывать особенности эволюции характеристик подповерхностных вихрей в любой области.

В главе 1 представлен краткий обзор подходов к исследованиям подповерхностных вихрей на поверхности океан, дается классификация вихрей и выделен класс исследуемых вихрей подповерхностных вихрей субтропической Атлантики (медди) и Северо-Европейского бассейна (Лофотенский вихрь). Раздел подготовлен весьма обстоятельно.

В **главе 2** 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. Оценено извлечение вихрями, приносимого течением в регион тепла. Автором показано, что использование 3-х альтиметрических миссий AVISO может быть достаточно для надежной оценки выделения мезомасштабных структур.

В **главе 3** подробно рассмотрена статистика 3-х мерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей Норвежского и Гренландского морей на базе спутниковых и натуральных наблюдений. Описаны особенности пространственного распределения основных характеристики вихрей и показано значительное отличие вихрей Норвежского и Гренландского. Впервые показано, что слияние вихрей является одной из характерных особенностей их эволюции вблизи района их интенсивной генерации. Определено, что трехмерные свойства мезомасштабных вихрей в Норвежском и Гренландском морях, полученные по данным спутниковой альтиметрии и наблюдений *in situ*, показывают, что вихри Норвежского моря в целом имеют существенно больший объем, скорость вращения и величину температурных аномалий ядра по сравнению с вихрями Гренландского моря. Вероятная причина такого различия – существенная роль в Гренландском море механизмов генерации вихрей, альтернативных динамической неустойчивости средних течений, доминирующей в Норвежском море.

В **главе 4** на основе объективного анализа климатологических данных в виде 3х мерного распределения процентного содержания средиземноморской водной массы (СВМ) описывается уточненный характер распространения средиземноморских вод в Атлантике. Выделены пути преимущественного распространения верхнего и нижнего ядер СВМ. Показано, что течения могут способствовать распространению СВМ только в пределах первых сотен километров от Пиренейского полуострова, что указывает на важную роль медди в распространении СВМ в Атлантике. Выделено 2 группы меди и описаны их жизненные циклы.

В **главе 5** описываются механизмы диссипации и слияния вихрей квазипостоянного Лофотенского вихря. Показано, что общая высокая устойчивость ЛВ обуславливается сочетанием особенностей топографии Лофотенской котловины и параметров набегающего Норвежского течения. Выявлена сезонная эволюцию ядра ЛВ.

Глава 6 - одна из центральных в диссертации. Здесь впервые проведена систематизация натуральных исследований динамических проявлений медди и показано, что, несмотря на глубокое ядро (500-1200 м) эти вихри часто формируют выраженный сигнал на поверхности моря, который сравним по интенсивности с сигналами поверхностных антициклонов в районе исследования. Получены теоретические оценки, связывающие интенсивность сигнала с характеристиками ядер медди в приближении контурного вихря и для вихря Рэля. Теория хорошо описывает наблюдаемые изменения интенсивности сигналов медди на поверхности моря как ядер медди, так же и сезонную и широтную изменчивость интенсивности наблюдаемых сигналов. Автором предложена гипотеза о то, что эта интенсификация связана с взаимодействием медди с усиливающимися к западу поверхностными средними течениями.

В **главе 7** описываются особенности и механизмы формирования аномалий ТПО над подповерхностными антициклонами. Предложен механизм агеострофической циркуляции в ядре подповерхностного антициклона, поддерживающий подъем изопикн над ядром, и выведена формула расчета вертикальной скорости в центральной части ядра вихря Рэля.

В **главе 8 (Заключение)** автор суммирует основные результаты проведенного исследования средиземноморских вихрей субтропической Атлантики (медди), а также субполярные вихри Северо-европейского бассейна, включая квазипостоянный Лофотенский вихрь Нор-

вежского моря. Выявлены основных механизмов формирования, жизненные циклы и диссипация; предложены механизмы изменчивости, методы идентификации, отслеживания подповерхностных вихрей по спутниковым данным. Как значительное преимущество предлагаемой работы по оценке закономерностей подповерхностных вихрей океана, отметим комплексность исследования: применение данных натуральных наблюдений, разнообразных спутниковых сведений, численного математического моделирования. Оригинальные выводы получены автором по данным большего объема современных и исторических данных контактных и дистанционных наблюдений, тщательного предварительного анализа этих материалов; хорошей согласованности между результатами анализа спутниковых и *in situ* данных. Достоверность результатов используемых в работе численных моделей определяется предварительной тщательной валидацией характеристик объектов исследования в результатах моделирования относительно натуральных данных.

К работе имеется ряд замечаний:

- Основные результаты работы получены для вихрей средиземноморских вод. Приводится изменчивость их характеристик за время существования, оценено время существования вихрей. Насколько универсальны полученные особенности динамики подповерхностных вихрей? Можно ли их применять для описания эволюции других типов подповерхностных вихрей?

- В работе проведено статистическое описание характеристик вихрей меди, но не очень четко показано, а насколько велика их роль в формировании языка Средиземноморской водной массы в Атлантическом океане.

- Теоретические оценки проявления мезомасштабных вихрей на поверхности моря выведены при определенных ограничениях на динамику вихрей, которые подробно не описаны в работе. Однако следовало бы указать имеющиеся ограничения в использовании теоретических оценок.

- Замечаниям к Главе 1. В разделе 1.4. автором отмечается, что работа посвящена исключительно исследованию вихрей типа монополю, а вихревые структуры типа хетоны, грибовидные течения или модоны, в которых сосуществуют ядра с относительной завихренностью разного знака в данной работе не рассматриваются. Представляется, что это следовало бы сразу отметить во введении диссертации.

- Рис. 1.3 «Районы исследования...». На рис. весьма странно представлены «слившееся» вместе Европы и Африка.

- На стр. 43 дается описание особенностей Норвежского течения... Дана ссылка на рис. 1.6. А на стр. 44. Дано название Рисунок. 1.6. «Рельеф дна Лофотенской котловины (м)...». Лучше назвать особенности динамики вод в районе Лофотенской котловины.

- на стр. 51-53 и в методическом разделе весьма кратко представлены сведения об использованных в работе *in situ* наблюдениях.

Раздел изобилует приблизительными определениями. Например, такими как «в сравнительно небольшой области..», «сильный динамический сигнал», «достаточно большое количество..», «наиболее интенсивное вихреобразование..», «Сильная неустойчивость является источником интенсивной мезомасштабной вихревой динамики» и др.

- Подобное замечание и к Главе 3 – наличие большого числа «качественных» определений, таких, как: «наиболее интенсивные», «существенная роль..» и др.

- В главе .5. Слабая формулировка вывода: «Доказано, что аномально высокая устойчивость Лофотенского вихря связана с небольшой особенностью (??) донной топографии..». Что означает «небольшой особенностью»?

- Замечание к Главе.7. Некоторые выводы построены на предположениях. Как, например, вывод 4 на стр. 295. «Показано, что инерционные слагаемые, вкуче с интенсивной динамикой верхнего слоя океана, являются наиболее вероятной (?) причиной усиленной диссипацией кинетической энергии..».

Резюмируя, отмечу, что выполненное исследование представляет значительный вклад в такой важный раздел океанологии, как функционирование мезомасштабных вихревых образований в Мировом океане, в особенности в исследование подповерхностных вихрей субтропической Атлантики (медди) и Североевропейского бассейна (Люфотенских вихревых образований), с оценкой их вклада в формирование особенностей крупномасштабной динамики вод океана. Полученные сведения - результат многолетних исследований автора. Оригинальные выводы получены автором по данным большого объема современных и исторических данных, контактных и дистанционных наблюдений, тщательного анализа этих материалов; хорошей согласованности между результатами анализа спутниковых и *in situ* данных. Значительное достоинство диссертационной работы по оценке закономерностей проявления подповерхностных вихрей океана - в ее комплексности. Применяется анализ данных натурных наблюдений, разнообразных спутниковых сведений, численного математического моделирования. Работа выполнена на высоком, мировом научном уровне, о чем свидетельствует большое число статей, опубликованных в наиболее авторитетных журналах, принадлежащих, как правило, к квартилям - Q1 и Q2.

Диссертация Башмачникова Игоря Львовича «Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана» соответствует критериям, которые отвечают диссертации на соискание доктора географических 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. Нарушений пунктов 9, 11 ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено.

Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора географических 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, д.г.н., профессор, чл.-корр. РАН,
Главный научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

19.01.2025

/ Филатов Николай Николаевич/

185030, Петрозаводск, А.Невского 50, ИВПС КарНЦ РАН, тел. 8-814-2-576381

Подпись гл.н.с., чл.-корр. РАН Филатова Николая Николаевича

Заверяю



Главный документовед ИВПС КарНЦ РАН
Григорьевская Н.Ю.