

ОТЗЫВ

председателя 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 специальности 1.6.17. – Океанология.

Основной целью диссертационной работы Башмачникова Игоря Львовича является оценка изменений характеристик подповерхностных вихрей на различных этапах их жизненного цикла и выявление особенностей проявления подповерхностных вихрей на поверхности океана.

Работа состоит из введения, 7 глав, заключения, библиографического списка из 569 наименования, 133 рисунка и 14 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведена классификация вихрей, выделен класс исследуемых вихрей; описаны основные аспекты динамики вихрей, используемые в дальнейшем ходе работы; даны краткие характеристики исследуемых типов подповерхностных вихрей субтропической Атлантики (медди) и Северо-Европейского бассейна (Лофотенский вихрь); дан краткий обзор подходов к исследованиям проявлений подповерхностных вихрей на поверхности океана.

В главе 2 описываются используемые далее 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 главе 3 впервые приводится статистика 3х мерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей Норвежского и Гренландского морей на базе спутниковых и натурных наблюдений. Описаны особенности пространственного распределения по акватории основных характеристики вихрей (количество на единицу площади, радиус, вертикальная мощность, аномалии температуры в ядре, скорость вращения ядра и скорость перемещения вихрей). Показано, что вихри Норвежского и Гренландского морей отличаются практически по всем перечисленным выше характеристикам. На основе натурных данных впервые показано, что слияние вихрей является одной из характерных особенностей их эволюции вблизи района их интенсивной генерации. Даны оценки потоков тепла с вихрями, генерируемые восточной ветвью Норвежского течения. Показано, что вихри извлекают порядка 1/3 тепла, приносимого течением в регион, и могут эффективно сглаживать приходящие с юга аномалии температуры воды.

В главе 4 описывается уточненный характер распространения средиземноморских вод в Атлантике, впервые полученный на основе объективного анализа климатологических данных и представляющий собой 3х мерное распределение процентного содержания средиземноморской водной массы (СВМ), полученное методом Оптимального мультипараметрического анализа. Выделены пути преимущественного распространения верхнего и нижнего ядер СВМ. Получено уточненное поле средних течений на промежуточных глубинах и 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. Получены статистические данные об изменчивости характеристик медди с расстоянием от районов их генерации; уточнены основные пути движения медди. Показано, что характеристики медди, формирующихся в северной части склона Пиренейского полуострова, существенно отличаются от таковых в южной и что это различие сохраняется далеко на запад от районов генерации медди. Это позволило разделить медди на 2 группы: северные и южные. Описаны особенности жизненных циклов северных и южных медди, выявлены роль слияния медди в их жизненном цикле и ряд особенностей разрушения медди.

В главе 5, на примере квазипостоянного Лофотенского вихря, описываются механизмы диссипации и слияния вихрей. Показано, что диссипация вихрей в океане может существенно отличаться от результатов квазигеострофических (QG) моделей, используемых для оценки степени устойчивости вихрей. Показана роль сильных внешних деформаций поля скорости у границы антициклонов в повышении их устойчивости за счет «сброса» энергии неустойчивости через генерацию и отрыв филаментов от ядра вихря. 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. Исследованы роль экрана потенциальной завихренности на периферии вихря и наличия поля скорости третьего вихря в слиянии двух антициклонов.

В главе 6 впервые 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. Получены теоретические оценки, связывающие интенсивность сигнала с характеристиками ядер медди в приближении контурного вихря и для вихря Рэлея. Показано, что теория хорошо описывает наблюдаемые изменения интенсивности сигналов медди на поверхности моря для разных характеристик ядер медди, а также сезонную и широтную изменчивость интенсивности наблюдаемых сигналов медди. Отмечена западная интенсификация сигналов медди на поверхности моря, не описываемая теорией. Выдвинута гипотеза, 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. 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. Предложен механизм агеострофической циркуляции в ядре подповерхностного антициклона, поддерживающий подъем изопикн над ядром, и выведена формула расчета вертикальной скорости в центральной части ядра вихря Рэлея.

Замечания.

1. Во «Введении» формулировка цели работы (стр. 9), на наш взгляд, не в полной мере отражает значимость и масштабность полученных соискателем результатов.
2. На стр.8 соискатель пишет, ссылаясь на работу (Chelton et al., 2011), что «...по данным спутниковой альтиметрии AVISO была получена статистика характеристик мезомасштабных

образований (радиусов, интенсивности возмущения уровня моря, показателей нелинейности, скорости движения вихрей и др.). В частности, было показано, что подавляющее большинство наблюдаемых на поверхности океана мезомасштабных эллиптических структур (90% и более) имеет показатель нелинейности (отношение азимутальной скорости вращения v к скорости движения вихря Vm) $v/Vm > 1$, что позволяет характеризовать их как сильно нелинейные волны или вихри (Chelton et al., 2011). Причем, вне тропиков, примерно 50% таких структур имели $v/Vm > 5$, что говорит о захвате и переносе массы ядром и является одним из основных признаков вихрей. В связи с этим, большинство мезомасштабных структур в океане, характеризующихся замкнутыми линиями тока, которые ранее интерпретировались как волны Россби, стали интерпретироваться как вихри».

На основе таких оценок параметра нелинейности нельзя делать вывод о сильной нелинейности низкочастотных волн и преобладании вихрей над волнами. Во-первых, оценка скорости течений, полученная по спутниковым альтиметрическим уклонам уровня моря, включает в себя не только азимутальную скорость вращения в вихре. Эта оценка течений – результат суперпозиции и нелинейного взаимодействия океанологических процессов, имеющих разную природу, пространственные и временные масштабы, таких как, например, ветровые и бароградиентные течения, различные виды низкочастотных волн. Во-вторых, основными характеристиками волн являются частота и волновое число. Поэтому для корректной оценки параметра нелинейности в низкочастотных волнах скорости течений в волне и её фазовые скорости должны рассчитываться на частотах энергонесущих максимумов в спектрах колебаний течений и уровня моря.

3. Релаксация водных масс к состоянию равновесия происходит, в том числе, и на частоте инерционных колебаний. Эти колебания проявляются на квазимгновенных радиолокационных снимках также в виде вихревых образований, не являясь таковыми. К.Д.Сабинин относит их к инерционным волнам (Коняев и Сабинин, 1992). Горизонтальные масштабы инерционных волн, рассчитанные по инструментальным измерениям, варьируют от километров до десятков километров (Коняев и Сабинин, 1992). В работе не исследуется эта важная проблема разделения на спутниковых радиолокационных снимках инерционных колебаний и субмезомасштабных и мезомасштабных антициклонов.

4. Используемые в работе методы анализа контактных, спутниковых и модельных данных и интерпретация полученных на их основе результатов, оставляют сомнения, относительно идентификации выделенных соискателем структур в полях океанологических характеристик только лишь как подповерхностных и поверхностных мезомасштабных вихрей. На зонально-временных разрезах изменений уровня моря, полученных на основе альтиметрических измерений, данных реанализов гидрофизических полей и результатов численных экспериментов с вихреразрешающими моделями в северной Атлантике отчетливо выражена волновая структура колебаний, проявляющаяся в виде упорядоченной последовательности ложбин и гребней в поле уровня моря, которые распространяются на запад и являются очень устойчивыми во времени, прослеживаясь без существенных изменений иногда до 2- 3 лет (Osychny and Cornillon, 2004; Watelet et al., 2020). Характеристики этих волн хорошо согласуются с теоретическими дисперсионными соотношениями бароклинных волн Россби (Watelet et al., 2020). Однако, соискатель идентифицирует выделенные на поверхности и в глубинном слое мезомасштабные структуры в полях океанографических характеристик только как вихри. Это ограниченный взгляд на мезомасштабную изменчивость океанологических полей.

Волновые поля у захваченных видов градиентно-вихревых волн (например: шельфовые волны, желобовые волны, бароклинные волны Россби в струйных потоках) имеют вихревую структуру, представляющую собой цепочки вихревых образований разных знаков (Mysak et al., 1979; Ефимов и др., 1985; Гневывшев и др., 2023). Для этих волн струйные потоки, шельфы и подводные желоба являются волноводами, от края которых происходит отражение волн, в

результате чего в направлении, перпендикулярном вектору фазовой скорости формируется стоячая компонента волнового движения с узловыми зонами и пучностями, где образуются конвергентно-дивергентные движения, приводящие к процессам вертикального перемешивания. Эти особенности динамики захваченных градиентно-вихревых волн приводят к формированию вихревой структуры волнового поля. В бароклинные моды захваченных градиентно-вихревых волн их вертикальная структура будет складываться из вихревых образований разных знаков. Поэтому поверхностные и подповерхностные вихревые образования, которые соискатель идентифицирует, как мезомасштабные вихри, могут быть также интерпретированы, как отдельные фрагменты волнового поля в захваченных градиентно-вихревых волнах. Однако, для распознавания в таком поле захваченных градиентно-вихревых волн, их выделения и идентификации следует использовать другие методы анализа океанологической информации, и это, прежде всего, статистические методы, такие как оценивание трёхмерных спектров в полях течений и уровня моря, пространственно-временных взаимных корреляционных и взаимных спектральных функций, оцененных в стационарном приближении и с учетом нестационарности процессов. Наличие узкополосных значимых пиков спектральной плотности в трёхмерных спектрах, при высоких значениях когерентности, свидетельствующих об устойчивости в пространстве и во времени разности фаз колебаний, а также хорошее согласие эмпирических характеристик возмущений уровня моря и течений с теоретическими дисперсионными соотношениями градиентно-вихревых волн, будут свидетельствовать о волновой природе динамических возмущений на частотах энергонесущих максимумов.

Отсутствие репрезентативных статистических методов анализа контактной, спутниковой и модельной информации является, на наш взгляд, заметным недостатком работы, ограничивающим возможности наиболее правильной и полной трактовки результатов анализа океанологических данных.

5. Подобные замечания и пожелания касаются и Северо-Европейского бассейна (СЕБ). На стр. 43 соискатель пишет, что «Volkov et al. (2013) обнаружили также дипольную и квадрупольную волновые структуры (1ая и 2ая азимутальная моды топографических волн Россби), которые вращаются против часовой стрелки в Лофотенской котловине (ЛК), что еще более усложняет структуру региональной циркуляции». Эти особенности мезомасштабной динамики вод в исследуемом районе также могут свидетельствовать, что Лофотенский вихрь является всего лишь отдельным фрагментом захваченной котловиной градиентно-вихревой волны. В этом случае пространственная структура динамических полей, по-видимому, может быть подобна моде градиентно-вихревых волн в замкнутом бассейне, описанной в работах (Longuet-Higgins, 1965; V, T, Buchwald, 1973; LeBlond and Mysak, 1978; Pedlosky, 1979). Поле волновых движений в таком бассейне имеет признаки как стоячих, так и поступательных волн. В нём наблюдаются два типа узловых линий: линии первого типа соответствуют узлам огибающей функции и их положение в пространстве по времени не меняется, а узловые линии второго типа, разделяющие вихревые образования разных знаков, соответствуют несущей волне и перемещаются с фазовыми скоростями градиентно-вихревых волн (Longuet-Higgins, 1965).

Однако эту гипотезу нельзя проверить с помощью методических подходов, которые использует соискатель. Здесь, по мимо описанных нами выше статистических методов, следует обязательно произвести вейвлет-анализ и разложение ансамблей полей уровня моря и течений (на разных горизонтах) на комплексные естественные ортогональные функции (ЕОФ). Пространственное распределение фазы комплексных ЕОФ позволит выделить узловые линии и пучности в динамических полях и особенности поступательного волнового движения.

6. К недостаткам работы следует отнести отсутствие численных экспериментов с трёхмерной вихреразрешающей гидродинамической моделью, направленных на изучение собственных (баротропных и бароклинных) колебаний в СЕБ и ЛК, в частности. Для этого

модельную область СЕБ нужно закрыть твёрдыми границами, все коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии, а также придонного трения задать минимально возможными, в качестве начальных условий задать средние многолетние для СЕБ поля температуры и солёности, вывести такую динамическую систему из равновесного состояния, затем воздействие возмущающих сил отключить и исследовать особенности релаксации водных масс к состоянию равновесия. Не исключено, что по результатам такого численного эксперимента мы увидим в ЛК те же особенности вихревой динамики, что и по анализу натуральных данных. Однако это будет уже не Лофотенский вихрь, описанный соискателем, а собственные колебания 2-го рода, т. е. свободные градиентно-вихревые волны, модифицированные особенностями донной топографии и стратификацией.

Без проверки альтернативной (волновой) гипотезы, вихревая трактовка мезомасштабных возмущений в полях океанологических характеристик остаётся ограниченной и спорной.

7. К заметным недостаткам работы следует также отнести отсутствие исследования влияния анемобарических сил на генерацию мезомасштабных возмущений в динамических полях исследуемых соискателем акваторий океана. Теоретические исследования показывают, что генерация вихревых образований прямым атмосферным воздействием является весьма эффективным механизмом формирования мезомасштабной изменчивости океанологических полей (Лаппо, 1979; Frankignoul and Müller, 1979; Ефимов и др., 1985; Каменкович и др., 1985). При такой постановке задачи, особенно интересным выглядит изучение возможности резонанса между возмущениями в полях атмосферного давления, касательного трения ветра и собственными колебаниями бассейна и его воздействие на генерацию мезомасштабных вихревых образований. На возможность реализации такого механизма может указывать наблюдающееся увеличение более чем в 2 раза дисперсии мезомасштабных колебаний уровня моря (Захарчук и др., 2004) и кинетической энергии мезомасштабных вихрей, выделенных по траекториям поверхностных и подповерхностных дрейфтеров в ЛК (Rossby et al., 2009b; Koszalka et al., 2011) (стр. 72). Такие исследования можно было провести, например, с помощью описанных выше статистических и математических методов анализа современной гидрометеорологической информации.

В целом, приведенные замечания не снижают уровень основных результатов диссертации. Полученные соискателем результаты существенно развивают наши представления о механизмах генерации, особенностях эволюции, вертикальной структуре и диссипации мезомасштабных вихрей в океане. Не вызывает сомнения, что диссертация Башмачникова Игоря Львовича обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Диссертационная работа Башмачникова Игоря Львовича обобщает исследования автора, опубликованные в 1 монографии, 23 статьях в журналах, индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web of Science, из списка ВАК, что свидетельствует о высокой публикационной активности соискателя.

С учетом всего вышесказанного полагаю: содержание диссертации 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 разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее существенное значение для развития теоретических и эмпирических исследований мезомасштабной изменчивости океанологических полей.

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.

Председатель диссертационного совета
по специальности 1.6.17 - океанология,
доктор географических наук, профессор,
и. о. зав. кафедрой океанологии
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный университет»



Захарчук Евгений Александрович

22.01.2025