

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 и краткая характеристика работы

В динамике крупномасштабных движений в океане вихри играют важнейшую роль, которые эффективно диссипируют энергию средних движений и замыкают балансы массы, тепла и соли крупномасштабных циркуляционных структур путем трансфронтального переноса термохалинных характеристик. Вихри также влияют на уровень первичной продуктивности вод океана. Появление спутниковых методов наблюдения поверхности океана привело к бурному развитию исследования характеристик вихрей на поверхности океана. Подповерхностные вихри исследованы значительно меньше.

Основной целью диссертационной работы Башмачникова Игоря Львовича является исследование статистических характеристик мезомасштабных вихрей в океане, характера их движения, механизмов, определяющих их эволюцию, а также характер проявления вихрей на поверхности моря. Работа состоит из введения, 7 глав и заключения, библиографического списка из 569 наименований, 127 рисунков и 14 таблиц. Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены положения, выносимые на защиту. Приведены публикации (всего 23 в журналах, которые входят в базы Scopus и Web of Science, включенных в список ВАК, РИНЦ, включая 17 — в журналах уровня Q1, и 1 глава в книге) и представлена апробация работы.

Для решения поставленных в работе задач и достижения цели автором привлечен обширный эмпирический материал, включающий ряды инструментальных наблюдений температуры и солёности воды, траекторий движения дрейфтеров, данные спутниковых наблюдений (спутниковой альтиметрии, температуры поверхности моря, цвета океана и, радиолокационные изображения), данные океанографических и метеорологических реанализов, а также результаты расчетов с помощью численных гидродинамических моделей. Анализ данных выполнялся при помощи современных методов исследования океанологических полей. Многие из используемых в работе методик были предложены или доработаны автором. В результате исследований были получены новые научные результаты, которые представлены в положениях, выносимых на защиту. Поскольку они являются центральным местом диссертационной работы, то рассмотрим их по порядку, отметив достоинства и недостатки.

Положения, выносимые на защиту и их обсуждение

***Положение 1.** Выделено две группы медди, северные и южные, которые приобретают свои различия во время их генерации. Южные медди, по сравнению с северными, более компактны, имеют большую солёность и температуру, большую скорость вращения ядра и более устойчивы. Показано, что на расстояниях менее 600 км от Пиренейского полуострова слияние медди преобладает над их разрушением, тогда как на больших расстояниях разрушение доминирует. Показано, что при пересечении Азорского течения медди теряют часть своей массы и кинетической энергии.*

Данное положение рассматривается в 4-й главе. Показано, что вихри средиземноморских вод (медди) делятся на две группы в зависимости от районов их происхождения, и медди каждой из групп сохраняют свои индивидуальные отличия на расстоянии тысячи километров от

районов генерации. Оцениваются статистические свойства медди и их изменение с ростом возраста медди, а также основные пути движения медди.

Научная новизна. **Впервые** рассмотрены данные об изменчивости характеристик вихрей средиземноморских вод в Атлантике (медди), как функция расстояния от района их генерации вдоль границы Пиренейского п-ва. В связи с тем, что медди движутся преимущественно по одним и тем же маршрутам и с примерно одинаковыми скоростями, это позволило не просто дать средние характеристики медди (таких работ много), а изучить изменения характеристик медди с увеличением их возраста. **Впервые** показано, что на расстоянии менее 600 км в эволюции медди преобладает слияние с другими медди, а на больших расстояниях — постепенная деградация ядер медди путем обмена с окружающей средой

Практическая значимость. Выявлены характерные этапы эволюции мезомасштабных вихрей, что важно для понимания путей параметризации этих структур в моделях динамики океана.

Недостатки. Медди являются специфическим видом подповерхностных вихрей. Неясно, можно ли распространить проведенный подробный анализ их жизненного цикла на другие типы подповерхностных вихрей в океане. К сожалению, отсутствует статистика повторяемости (внутригодовой и межгодовой) медди, что является необходимым условием установления закономерностей их изменчивости.

Положение 2. На примере Лофотенского вихря показано, что слияния, в отличие от дифференцированной конвекции, приводят к значительному росту интегральной кинетической энергии вихря. Наличие экрана потенциальной завихренности на периферии вихрей в летний период затрудняет слияния; подавляющее число слияний антициклонов с Лофотенским вихрем происходит в зимне-весенний период в связи с разрушением экрана зимней конвекцией. Присутствие третьего вихря может способствовать слиянию.

Данное положение рассматривается в 5-ой главе. Выявлен характер изменения кинетической и потенциальной энергии антициклона (Лофотенского вихря) как при его слиянии с поверхностными антициклонами, так и при развитии интенсифицированной осенне-зимней конвекции в ядре вихря по сравнению с окружающим океаном. Выявлена и физически обоснована сезонность в количестве слияний антициклонов с Лофотенским вихрем. Обоснованы условия, способствующие слиянию вихрей.

Научная новизна. Роль поля деформации соседнего вихря в слиянии антициклонов с Лофотенского вихря ранее не исследовалась, как и сезонность процесса слияния вихрей. **Впервые** выявлено влияние механизмов слияния и конвекции на изменение как кинетической, так и потенциальной энергии Лофотенского вихря. Показано влияние вертикальной конвекции на слияние с другим вихрем. Выявлена сезонная эволюция ядра Лофотенского вихря в виде весеннего перемешивания, весенней релаксации и летне-осенней релаксации изопикн. *Практическая значимость.* Исследовались механизмы регенерации квазистационарного вихря, являющегося элементом поля скорости средних поверхностных течений в регионе.

Недостатки. Характер взаимодействия трех вихрей при их слиянии исследовался на единичном примере. В выводах гл. 5 сказано о применении кластерного анализа для выявления сезонной эволюции ЛВ. В работе использовался метод к-средних. Однако при этом не указан размер исходной матрицы, метрика расстояния, число задаваемых классов, которое требует тщательного обоснования, поскольку это влияет на интерпретацию полученных результатов. Данный метод строго распределяет исходные точки в заданные классы. Однако из рис. 5.2, б видно, что большая часть исходных точек вообще не входит в заданные классы. Почему?

Положение 3. На примере Лофотенского вихря показано, что устойчивость антициклона может существенным образом зависеть от небольших особенностей топографии. Высокая устойчивость

Лофотенского вихря связана с наличием небольшой впадины на дне Лофотенской котловины на фоне средней циклонической циркуляции котловины.

Данное положение рассматривается в 5-ой главе. Исследуются особенности конфигурации Лофотенской котловины, которые вместе с конфигурацией ветвей Норвежского течения в районе котловины, являются важнейшим фактором, определяющим устойчивость антициклонического вихря в центре котловины.

Научная новизна. Установлены причины устойчивости антициклонического вихря в центральной части океанической котловины. Показано, что в разрушении Лофотенского вихря наиболее эффективны возмущения низких азимутальных мод.

Практическая значимость. Выявленные особенности характера разрушения Лофотенского вихря позволяют оценить время жизни мезомасштабных вихрей в океане при разном характере донной топографии, что важно для оценок характера переноса вещества мезомасштабными вихрями.

Недостатки. Рассмотрен стационарный вихрь, тогда как для анализа роли вихрей в формировании водных масс наиболее важно было бы оценить время жизни перемещающихся вихрей.

Положение 4. *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. Выведенные теоретические зависимости позволили объяснить широтную и сезонную изменчивость интенсивности поверхностных сигналов медди изменчивостью отношения частоты плавучести верхнего слоя океана к параметру Кориолиса. Помимо выделенных в теории факторов, интенсивность поверхностного сигнала медди зависит от скорости среднего течения верхнего слоя океана.*

Данное положение рассматривается в 6-ой главе. Автором исследуется устойчивость сигнала медди на поверхности моря, связь интенсивности сигнала с характеристиками ядер медди и фоновыми условиями океана, а также причины эпизодического исчезновения поверхностного сигнала в данных спутниковой альтиметрии, которые создают сложности для их отслеживания. Автором впервые проведена систематизация натуральных исследований динамических проявлений медди на поверхности моря, в частности, рассмотрен механизм проявления сигнала подповерхностного вихря на поверхности моря.

Научная новизна. **Впервые** показано, что сигнал медди на поверхности моря обычно достаточно устойчив и может непрерывно отслеживаться в течение нескольких месяцев. **Впервые** предложен механизм проявления медди на поверхности моря на основе закона сохранения потенциальной завихренности, вследствие чего на поверхности моря формируется самостоятельный антициклон. **Впервые** также выведены теоретические формулы, которые позволяют спрогнозировать интенсивность сигнала медди на поверхности моря. Показано, что интенсивность сигнала, помимо радиуса ядра и глубины ядра медди, существенно зависит от стратификации верхнего слоя моря (точнее от отношения f/N). Также автором отмечена западная интенсификация сигналов медди на поверхности моря, не описываемая теорией, которая предположительно связана с взаимодействием медди с усиливающимися к западу поверхностными средними течениями.

Практическая значимость. Данное исследование открывает возможность изучения подповерхностных вихрей с помощью спутниковых данных.

Недостатки. Большие ошибки в наблюдении параметров вихрей, используемых для оценки их сигналов в уровне моря, затрудняют верификацию полученных теоретических оценок.

Положение 5. Показано, что сигналы подповерхностных антициклонических вихрей проявляются в поле температуры поверхности океана (ТПО) как холодные аномалии. Предложена схема вторичной агеострофической циркуляции, которая поддерживает холодные аномалии ТПО над антициклоном с приповерхностным ядром. Усиление отрицательной аномалии ТПО происходит за счет захвата холодных вод и проникновения их в центральную часть поверхностного сигнала подповерхностного вихря и «обертывания» теплых вод вокруг холодного центра.

Данное положение рассматривается в 7-ой главе. Выявлена разница в проявлении в ТПО поверхностных и подповерхностных антициклонов. Рассматриваются физические механизмы формирования наблюдаемых различий и влияние подповерхностных вихрей на поле ТПО. Получены теоретические оценки максимальных вертикальных скоростей в центре ядра подповерхностного вихря.

Научная новизна. Впервые показано, что подповерхностные антициклоны характеризуются отрицательными аномалиями ТПО. Выделено два механизма формирования этих аномалий, которые являются следствием подъема изопикн над ядром подповерхностного антициклона. Впервые предложен механизм агеострофической (вертикальной) циркуляции в ядре подповерхностного антициклона, отличный от обычно предлагаемого типа циркуляции с опусканием вод в центре поверхностного антициклона. Этот механизм поддерживает подъем изопикн над ядром, что увеличивает устойчивость вихря.

Практическая значимость. Разница в проявлении поверхностных и подповерхностных вихрей в поле ТПО дает возможность различить поверхностные и подповерхностные антициклоны по спутниковым данным.

Недостатки. Полученные результаты базируются на анализе ограниченного количества подповерхностных вихрей.

Хочу отметить, что помимо научных результатов, отмеченных в положениях на защиту, в работе можно выделить еще ряд важных достижений, полученных автором впервые. Так, в гл. 3 впервые приводится статистика 3-х мерных характеристик поверхностных мезомасштабных вихрей Норвежского и Гренландского морей на базе комбинированные спутниковых и натурных наблюдений. Впервые показано, что вихри Норвежского моря существенно отличаются от вихрей и Гренландского моря, прежде всего, за счет своей большей вертикальной протяженности и существенно большей аномалии температуры относительно окружающего фона. Также впервые даны оценки потоков тепла с вихрями от Норвежского течения. Показано, что по мере движения вод течения через Норвежское море, вихри извлекают из восточной ветви Норвежского течения порядка $1/3$ тепла, которое поступает с течением на южную границу Норвежского моря.

Замечания по диссертации в целом

1. Хотя диссертация представлена по географии, однако по своему содержанию и смыслу она в большей степени соответствует физико-математическим наукам. Впрочем, будем уважать выбор автора.
2. Согласно требованиям ВАК объем диссертации должен составлять 200-300 стр. При этом должен использоваться шрифт Times New Roman размером 14 пт чёрного цвета и полуторный межстрочный интервал, а также рекомендуется 250-300 ссылок на публикации. Обращаемся к диссертации: объем 332 стр. шрифтом 12 кегля. Если перевести текст в 14 шрифт, получится более 400 стр. Ссылок 569. Формально это соответствует двум диссертациям. Если же рассматривать не формально, а по сути полученных автором научных результатов, то их также вполне достаточно для 2 диссертаций.
3. Во введении не указывается, каким пунктам паспорта специальности 1.6.17 Океанология (географические науки) соответствует диссертация. Очевидно, такими пунктами являются:

3. динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане;
15. методы исследований, моделирования и прогноза процессов и явлений в океанах и морях.
4. Существует явный перекося по исследованию мезомасштабных вихрей медди по сравнению с вихрями Норвежского и Гренландского морей. Однако с практической точки зрения эти вихри представляются более значимыми по сравнению с вихрями медди.
5. В научных публикациях обычно принято давать специальный раздел об использовании исходных данных. С учетом того, что автором применялся огромный эмпирический материал, включающий ряды инструментальных наблюдений температуры и солености воды, траекторий движения дрейфтеров, данные спутниковых наблюдений, океанографических и метеорологических реанализов и различных баз данных, очевидно, стоило сведения о них разместить в едином разделе. Однако автор выделил только на 3 стр. раздел 2.2.1 Используемые данные о мезомасштабных и субмезомасштабных вихрях по натурным и спутниковым данным.
6. Текст диссертации трудно читаемый: он перегружен второстепенными деталями, избыточной подробностью описания некоторых фактов, много утяжеленных предложений, которые усложняют понимание текста. В тексте присутствуют грамматические и стилистические ошибки. Часть графиков недостаточно высокого качества, имеют сложный для восприятия вид, возможно, автору стоило представить результаты в более простой форме. Много графиков состоит из нескольких (чаще всего из четырех) и более (до 8) фрагментов. На некоторых графиках отсутствует обозначение осей. Описание рисунков может достигать полстраницы, что затрудняет их понимание.

Однако отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на полученные автором научные результаты. Считаю, что диссертация Башмачникова Игоря Львовича на тему «*Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана*» можно считать законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.6.17 океанология (географические науки) по пунктам 3 и 15. В диссертации, на основании выполненных автором исследований, получены результаты анализа данных наблюдений и моделирования и разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Поэтому 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 специальности 1.6.17. Океанология. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета
Доктор географических наук, профессор
кафедры прикладной океанографии
и комплексного управления прибрежными зонами
Российского государственного гидрометеорологического
университета Министерства науки и
высшего образования РФ

15 января 2025 г.



Малинин Валерий Николаевич