

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Новоселовой Елены Владимировны на тему: «Мезомасштабная вихревая динамика Лофотенской котловины», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17. – Океанология.

Актуальность избранной темы. Актуальность темы и решаемой научной проблемы обусловлена важностью исследования мезомасштабных вихрей в океане, поскольку они оказывают существенное влияние на горизонтальный и вертикальный водообмен, влияют на пространственное распределение океанологических полей, а также оказывают значительное влияние на биопродуктивность морских экосистем. Несмотря на значительные успехи в понимании механизмов вихреобразования и их динамики, появлении новых возможностей проводить прямые и косвенные измерения параметров вихрей, появившиеся в последние десятилетия, формирование концепции, согласно которой основная энергия движения морских вод сосредоточена в океанических вихрях, требует актуализации и развития современного мониторинга изучения морской поверхности в части получения информации об изменчивости мезомасштабных вихрей и течений, закономерностях их пространственно-временного проявления и развития в Мировом океане. Автор акцентирует также низкую изученность поведения ядер вихрей, их взаимодействия друг с другом и с течениями, выживаемость вихрей в неоднородных внешних течениях. Для этого важно также обосновать выбор ключевого района Мирового океана, в котором изучены локальные максимумы дисперсии уровня океана и кинетической энергии вихрей, в котором наблюдаются вихревые ядра различной формы – от практически круглых до сильно вытянутых по горизонтали или извивающихся филаментных образований. Для этого автором выбрана Лофотенская котловина, в центре которой расположен квазипостоянный антициклонический Лофотенский вихрь, являющийся характерной особенностью котловины и представляющий собой естественную природную лабораторию для изучения вихревой динамики в океане (с.5 диссертации).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертации выполнено исследование пространственной, сезонной и межгодовой мезомасштабной вихревой изменчивости водных масс Лофотенской котловины. Не вполне удачной является формулировка цели: «Целью данного исследования является исследование...» (с.5 текста диссертации). Вполне логично было использовать термин «оценка» изменчивости. Для выполнения поставленной цели автором решены 6 задач (с.5-6, в скобках рецензентом указаны ключевые слова каждой задачи):

1) Уточнение методики расчёта бароклинного радиуса деформации Россби и определение его характерных значений для Норвежского и Гренландского морей, описание его межгодовой и сезонной изменчивости (**авторская методика расчета бароклинного радиуса деформации Россби, оценка его характерных значений, межгодовой и сезонной изменчивости радиуса для Норвежского и Гренландского морей**);

2) Проведение изопикнического анализа вод Лофотенской котловины: определение глубины залегания различных изопикнических поверхностей с оценками соответствующих термохалинных характеристик (температуры и солёности). Исследование пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости характерных изопикнических поверхностей Лофотенской котловины (**анализ полей температуры, солёности, плотности, выявление пространственной, сезонной, межгодовой изменчивости изопикнических поверхностей Лофотенской котловины**);

3) Сравнение кинематических и динамических характеристик вихрей разной полярности в Лофотенской котловине. Оценки характерных масштабов вихрей, потенциальной плотности, орбитальной скорости и относительной завихренности. Анализ

особенностей распределения частоты Вьяйсяля-Брента в циклонах и антициклонах. Оценки потенциальной завихренности по Эртелю и по Россби (**оценка параметров вихрей: масштаб, потенциальная плотность, орбитальная скорость, относительная завихренность и потенциальная завихренность, анализ и оценка кинематических и динамических характеристик вихрей разной полярности, распределение частоты Вьяйсяля-Брента в циклонах и антициклонах**);

4) Анализ пространственно-временной изменчивости Лофотенского вихря по ежесуточным данным за 2000–2019 гг. Определение границ ядра. Анализ изменчивости кинематических характеристик ядра: положение центра, объём, горизонтальные и вертикальные масштабы. Описание сезонной и межгодовой изменчивости указанных характеристик (**сезонная и межгодовая изменчивость Лофотенского вихря по ежесуточным данным за 2000–2019 гг: границы и кинематические характеристики ядра, изменчивость характеристик**);

5) Анализ сезонной и межгодовой изменчивости потенциальной плотности, орбитальной скорости, относительной и потенциальной завихренности Лофотенского вихря. Исследование связи между динамическими и кинематическими характеристиками Лофотенского вихря (**сезонная и межгодовая изменчивость потенциальной плотности, орбитальной скорости, относительной и потенциальной завихренности; связь между динамическими и кинематическими характеристиками вихря**).

6) Изучение эволюции мезомасштабных вихрей при их вытягивании в филаменты на основе теории и по данным реанализа. Вывод закона сохранения интегральных площадей доменов определенного свойства по данным реанализа GLORYS12V1. Построение карт распределений доменов для Лофотенской котловины и Мирового океана (**разноаспектная пространственная визуализация вихрей на основе ГИС и реанализа: эволюция, филаментация, типизация**).

Положения, выносимые автором на защиту и их соответствие задачам диссертации. Автором вынесено на защиту 3 положения (с.6-7), приведенных ниже. В скобках рецензентом дано соответствие положений задачам проекта.

1) Изопикническая адвекция в Лофотенской котловине является важным механизмом образования теплового резервуара субарктических морей (**задачи 1, 2, 4**).

2) Анализ сезонной и межгодовой изменчивости кинематических и динамических характеристик Лофотенского вихря с оценками потенциальной завихренности. Установлено, что интенсификация Лофотенского вихря происходит в летний период, а не в период зимней конвекции, когда происходит регенерация вихря (**задачи 3, 4, 5**).

3) Получены оценки интегральной площади доменов Лофотенской котловины и Мирового океана со свойством неограниченного вытягивания вихрей в субмезомасштабные филаменты (**задача 6**).

В ходе исследования автором сделаны **основные выводы, в которых подробно подведены итоги исследования и намечены перспективы работы (с.100-104, нумерация вывода сделана рецензентом, в скобках указано соответствие вывода разделу диссертации, текст выводов незначительно сокращен рецензентом)**:

1. В работе проведён анализ динамики Лофотенского вихря. Изучена межгодовая, сезонная и месячная изменчивость Лофотенского вихря, а также рассмотрены отдельные случаи на конкретные даты. Были вычислены и проанализированы следующие параметры, характеризующие Лофотенскую котловину: радиус деформации Россби; глубина залегания изопикнических поверхностей, а также температура и солёность на них; относительная и потенциальная завихренность; частота Вьяйсяля-Брента; параметр, характеризующий способность к вытягиванию в некоторой точке; пространственные размеры Лофотенского вихря: радиус, высота, широта и долгота центра вихря. (**Это первый абзац выводов, его**

можно также отнести к общему введению по выводам, отнесем его к 1 и 2 разделам работы, с.17-27 и 28-45, которые в целом не требуют доказательной базы).

2. На основе ежемесячных данных океанического реанализа ARMOR3D, который основан на ассимиляции всех доступных спутниковых данных за период 1993– 2018 гг. автором получены пространственные и временные оценки изменчивости бароклинного радиуса деформации Россби для Норвежского и Гренландского морей. Полученные оценки R_d согласуются с оценками других исследователей. В диссертации автор не только уточнила эти оценки, но заполнила пропуски в климатологии, составленной Челтоном (Chelton et al., 1998). Показано, что для Норвежского и Гренландского морей радиус деформации Россби в среднем не превышает 7–9 км. Для большей части исследуемого района сезонные колебания радиуса составляют 1–2 км, при этом наибольшие значения радиуса достигаются в тёплое время года (июль – сентябрь), а наименьшие – в холодное (январь – март). В Датском проливе и проливе Фрама сезонная изменчивость может превышать 3 и 4,5 км, соответственно. Межгодовая изменчивость радиуса деформации Россби не выражена, однако отмечается увеличение как средних, так и максимальных значений к концу периода 1993–2018 гг. Показано, что донная топография и конвективные процессы играют значительную роль в пространственном и сезонном распределении радиусов деформации Россби (**раздел 3 диссертации, с.46-53**).

3. На основе данных океанического реанализа GLORYS12V1 проанализированы четыре изостерические δ -поверхности в Лофотенской котловине: s_{41} , s_{31} , s_{21} и s_{07} . Рассчитаны распределения температуры и солёности на этих поверхностях, а также глубина их залегания. Установлено, что изостерические поверхности в котловине расположены со значительным наклоном в направлении с запада на восток. Это означает, что заглупление атлантических вод в котловине происходит в направлении, противоположном доминирующему направлению вихрей, переносящих теплые и соленые воды Норвежского склонового течения в центральную часть котловины. Так как эти процессы разнонаправлены, это приводит к увеличению продолжительности нахождения атлантических вод в Лофотенской котловине и усилению ее роли как теплового резервуара в регионе. Максимальное заглупление изостерических поверхностей происходит в центре котловины, где наблюдается квазипостоянный Лофотенский вихрь. Зимняя конвекция может проникать на большие глубины, превышающие 1000 м, способствуя ежегодной регенерации вихря, и еще больше усиливает заглупление изостер и создание большого «теплового бассейна» в этом месте. Струи Норвежского склонового течения также создают значительное заглупление изостер вдоль норвежского материкового склона, которое прослеживается до глубин 700–750 м. Рассчитанные максимумы глубин изостерических поверхностей s_{31} , s_{21} и s_{07} в среднем больше на 100–300 м, чем это отмечалось в более ранних исследованиях. Замкнутое углубление в виде чаши в центре Лофотенской котловины наблюдается уже на δ -поверхности s_{31} , тогда как в работе Rossby et al., (2009) оно появляется только на s_{21} . В межгодовой изменчивости максимум глубины поверхности s_{07} наблюдается в 2010 г., который отмечается как год аномально больших глубин верхнего квазиоднородного слоя в Лофотенской котловине, подтвержденных измерениями буев ARGO. Максимумы глубины залегания поверхности s_{07} в 2000, 2010, 2013 и 2016 гг. соответствуют годам глубокой конвекции, отмеченным в работе (Федоров и др., 2019). При этом максимальные площади, ограниченные изолиниями высоких значений глубин s_{07} , не соответствуют годам максимальной конвекции. Наибольшие площади, ограниченные изолиниями 900, 1000 и 1050 м, были в 1994, 2003, 2009 и 2014 гг. Есть основания предполагать, что глубокая конвекция может проявляться как большими глубинами верхнего квазиоднородного слоя в небольшой ограниченной области, так и меньшими глубинами, но распространяющиеся на большую площадь. Наибольшая сезонная изменчивость характерна для s_{41} , где максимальная глубина достигается в восточной части

акватории у скандинавского шельфа, а на остальных поверхностях – в области расположения Лофотенского вихря (за исключением нескольких карт для s31, где максимумы достигаются в восточной части бассейна). Выявлено, что на поверхностях s31, s21 и s07 максимальная глубина достигается не зимой или весной, в периоды глубокой конвекции, а летом. Области с наибольшими глубинами летом также имеют максимальную площадь, а зимой минимальны. Это означает, с одной стороны, определенную инерцию изменения термохалинных характеристик атлантических водных масс, а с другой – сдвиг на 1–2 сезона влияния глубокой конвекции на изостерические поверхности. В целом, изопикническая адвекция в Лофотенской котловине, как и диапикническое перемешивание, играют значительную роль в процессах, определяющих котловину как основной тепловой резервуар субарктических морей (**раздел 4 диссертации, с.54-67**).

4. Исследована роль частоты Вьяйсяля-Брента в мезомасштабных вихрях. По данным океанического реанализа GLORYS12V1 были рассмотрены два вихря Лофотенской котловины Норвежского моря: циклон и антициклон (Лофотенский вихрь). Для этих вихрей построены вертикальные разрезы потенциальной плотности и частоты Вьяйсяля-Брента, рассчитаны масштабы и орбитальные скорости, построены распределения частоты Вьяйсяля-Брента в ядре и ее аномалии относительно фоновой частоты Вьяйсяля-Брента, а также графики относительной и потенциальной завихренности. Было выявлено, что орбитальные скорости в циклоне достигают 30 см/с, а пространственные продольный и поперечный масштабы составляют 72,3 км и 48,8 км соответственно. Орбитальные скорости в антициклоне превышают 50 см/с (максимальное значение – 50,8 см/с), а пространственные продольный и поперечный масштабы – 108,7 км и 67,9 км. Изопикны в циклонах и антициклонах деформируются в среднем в противоположных направлениях. Циклонические вихри сближают изопикны, стягивая их внутрь вихревого ядра, в то же время антициклонические вихри раздвигают изопикны друг от друга. Последнее приводит к увеличению частоты Вьяйсяля-Брента в вихревом ядре циклона и соответствующему ее уменьшению в антициклоне. Показано, что аномалии частоты Вьяйсяля-Брента относительно фоновой частоты положительны в ядре циклона и отрицательны в ядре антициклона. Получено, что потенциальная и относительная завихренности, хорошо выделяются в вихревых ядрах (**раздел 5, подраздел 1 диссертации, с.68-73**).

5. В соответствии с общими физическими представлениями, ожидалось, что при вытягивании вихря по вертикали его интенсивность (модуль относительной завихренности и орбитальные скорости) будет наибольшей, и, наоборот, когда вихрь сплющивается, относительная завихренность должна также уменьшаться. Показано, что это не всегда выполняется. Наибольшая высота вихря наблюдается зимой, когда относительная завихренность минимальна. Это обусловлено разрушением термоклина и выходом вихря на поверхность. Следовательно, происходит его активное взаимодействие с атмосферой, т.е. закон сохранения потенциальной завихренности не выполняется. Если же рассмотреть случай, когда вихрь изолирован от поверхности, т.е. когда обе его вертикальные границы определяются заданными поверхностями равной потенциальной завихренности, наибольшая высота вихря соответствует его наибольшей интенсивности. Корреляция составляет 0,62. В то же время, связь между диаметром вихря и его интенсивностью отсутствует. Согласно нашим расчётам, диаметр вихря слабо меняется в течение года, наибольший диаметр вихря наблюдается летом – в период максимальной интенсивности вихря. Отсутствие связи между интенсивностью вихря и его диаметром может быть связано с тем, что боковые границы вихря выделялись по относительной завихренности (не по потенциальной), чтобы обеспечить замкнутость выделенной области. Как показало исследование, в целом усиление вихря происходит не в период зимней конвекции, которая является одной из причин его регенерации, а летом. Хотя об усилении вихря и увеличении интенсивности в зимний период говорилось в статье (Иванов, Кораблев, 1995b), натурные

исследования авторов ограничивались летним периодом и не касались оценки интенсивности вихря. Кроме того, были отмечены случаи «внезапной» интенсификации Лофотенского вихря, которые, вероятно, связаны со слиянием с другими вихрями (раздел 5, подраздел 2 диссертации, с.74-83).

6. Показано, что в ядре антициклонического Лофотенского вихря вытягивание отсутствует. Это объясняется тем, что вихрь должен оставаться локализованным образованием с ограниченными деформациями. При этом неограниченное растяжение мелких вихрей вокруг ядра Лофотенского вихря разрешено, здесь вихри могут трансформироваться в филаменты. Аналогично должны вести себя и другие достаточно интенсивные субмезомасштабные и мезомасштабные вихри. При сравнении суммарных площадей зон, разрешающих вытягивание вихрей ($\gamma / 1) e \leq$, и зон с запретом вытягивания ($|\gamma / e| > 1$) получено следующее свойство. Для одноградусной сетки без сглаживания гидрофизических полей площадь зоны, где вытягивание вихрей разрешено, составляет 66 %, а та же характеристика со сглаживанием полей – 60 %. Исследовано соотношение суммарных площадей зон, где вытягивание вихрей разрешено и запрещено, на одноградусной сетке без сглаживания полей и на той же сетке, но со сглаживанием полей. Получено, что суммарная площадь доменов Мирового океана, где вихри могут вытягиваться, больше в 1,5–2 раза, чем суммарная площадь доменов с запретом вытягивания вихрей (раздел 6 диссертации, с.84-99).

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в Диссертации. Личный вклад автора. В работе автором исследовалась динамика Лофотенского вихря. Изучена межгодовая, сезонная и месячная изменчивость Лофотенского вихря, а также рассмотрены отдельные случаи на конкретные даты. Были вычислены и проанализированы следующие параметры, характеризующие Лофотенскую котловину: радиус деформации Россби; глубина залегания изопикнических поверхностей, а также температура и солёность на них; относительная и потенциальная завихренность; частота Вэйсяля-Брента; параметр, характеризующий способность к вытягиванию в некоторой точке; пространственные размеры Лофотенского вихря: радиус, высота, широта и долгота центра вихря. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационном исследовании, обеспечивается применением апробированной методологии, современных методов анализа эмпирической информации, получивших международное признание и данных гидродинамических моделей, описывающих рассматриваемые процессы. Личный вклад автора заключается в выполнении всех этапов научного исследования, изложенных в диссертационной работе. В тексте работы приводятся результаты, полученные автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, автором были выполнены сбор данных, выбор метода их обработки, написание численных кодов для расчёта исследуемых характеристик, их анализа, систематизации и визуализации полученных результатов. Автор принимала участие в физической интерпретации полученных результатов, подготовке текста публикаций.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности, теоретической и практической значимости работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка условных обозначений и списка литературы. Результаты диссертационного исследования представлены на 121 странице и включают в себя 39 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает в себя 173 наименования.

Исследования, составившие содержание работы, имели финансовую поддержку: гранты РФФИ № 18-17-00027 «Вихревая динамика Лофотенской котловины и ее роль в переносе термохалинных свойств вод в Норвежском море» и № 22-27-00004 «Исследование динамики изолированных вихрей в океане с использованием методов дистанционного

зондирования, *in situ* и модельных данных», а также грант СПбГУ № 75295423 и № 94033410 «Атлантические ворота в Арктику: океаническая циркуляция как фактор долгосрочной изменчивости климата Арктики и состояния полярных экосистем».

В целом, содержание работы соответствует заявленным цели и задачам и раскрывает положения, выносимые на защиту. По теме диссертационного исследования опубликовано 10 статей (2 на русском, 3 на английском языке, 5 на русском и английском языках). Все 10 статей опубликованы в периодических изданиях, включенных в список Web of Science/Scopus. 9 статей в российских периодических изданиях, включенных в список ВАК. Кроме этого, ещё 2 статьи приняты к печати.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, докладывались и обсуждались на 30 конференциях, среди которых 12 российских и 17 международных. Отдельные результаты исследований, полученные в рамках диссертационной работы Е.В. Новоселовой, были отмечены наградами: 1) Диплом победителя в Конкурсе молодых ученых на лучшую научную работу (Институт космических исследований РАН, 2020 г.), тема научной работы «Сезонная изменчивость изопикнических поверхностей в Лофотенской котловине». 2) Грамотой за доклад «Оценка потенциальной завихренности в Лофотенской котловине» на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022» (11–22 апреля 2022, Москва).

Вопросы и замечания по тексту работы.

1. К недостаткам работы относятся: отсутствие в тексте формулировок научной проблемы, частной задачи в рамках этой проблемы, объектов и предметов исследования, соответствия содержания работы паспорту специальности 1.6.17. – Океанология (области исследования). В цели исследования («исследование пространственной, сезонной и межгодовой мезомасштабной вихревой изменчивости Лофотенской котловины», с.5 диссертации) ключевыми словами являются «исследование изменчивости», - обобщенный термин, не раскрывающий содержания и решаемую частную задачу в рамках научной проблемы.

2. Рассмотрение соответствия между формулировками задач работы, защищаемых положений, выводов вызвало некоторые затруднения при рецензировании. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Защищаемое положение — это новый научный результат (конкретизация гипотезы), который доказывается в выполненной работе и докладе, входит в результаты и рекомендации по работе. «Новые» означает, что такая мысль еще не была озвучена ранее, «научные» — те, которые имеют рациональное объяснение и могут быть проверены экспериментально. Не менее важным является то, что защищаемые положения требуют доказательства и доказываются автором в работе и докладе.

Автором, поставившим и выполнившим 6 задач научного исследования, на защиту вынесены 3 защищаемые положения. Это логично обуславливает необходимость агрегирования задач при рассмотрении защищаемых положений. А это, в свою очередь, позволяет изменить структуризацию работы и снизить общее количество глав (разделов) в тексте диссертации. Другим выходом могло бы быть увеличение числа защищаемых положений и количества выводов по работе в целом. Судя по выводам диссертации, это было вполне выполнимо. Количество вынесенных на защиту положений автор ограничил тремя положениями и вынес их на защиту с предельно лаконичной формулировкой. Текст раздела «Научная новизна» структурирован и содержит шесть формулировок новизны исследования. Эти формулировки могли соответствовать шести выносимым на защиту научным положениям, шести задачам и шести выводам по содержанию диссертации в целом (выводы не структурированы).

3. В п.6 новизны читаем: «Проанализировав среднемесячные данные океанического вихреразрешающего реанализа за более чем 20-летний период, показано, что доля

интегральных областей поверхности Мирового океана, где вихри могут вытягиваться при взаимодействии с баротропным потоком, составляет примерно 60–66 %. Для данной оценки отсутствует межгодовая и сезонная изменчивость, что позволяет сформулировать закон сохранения интегральных площадей доменов, где мезомасштабные вихри могут вытягиваться в филаменты». Такой вывод мог закончиться формулировкой нового закона в авторской редакции. Или это задача будущих исследований авторского коллектива?

Заключение о соответствии Диссертации критериям, установленным «Порядком присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук в Санкт-Петербургском государственном университете», включая соответствие критерию, установленному пунктами 9 и 11 настоящего Порядка.

Диссертация Новоселовой Елены Владимировны на тему: «Мезомасштабная вихревая динамика Лофотенской котловины» на соискание ученой степени кандидата наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития соответствующей отрасли знаний (1.6.17. – Океанология). В целом рецензент отмечает актуальность, высокий уровень выполненного исследования, его значимость для науки, полученные автором результаты в решении поставленных задач, высокую перспективность исследований. Работа соответствует паспорту специальности ВАК 1.6.17. – Океанология.

Диссертация Новоселовой Елены Владимировны на тему: «Мезомасштабная вихревая динамика Лофотенской котловины» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Новоселова Елена Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата географических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета
доктор географических наук, профессор, профессор
кафедры Гидрологии суши Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет"



Дмитриев Василий Васильевич

Дата 10.11.2023