

ОТЗЫВ

официального оппонента Иванова Владимира Владимировича,
доктора физико-математических наук,
ведущего научного сотрудника отдела взаимодействия океана и атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» на диссертационную работу Зимина Алексея Вадимовича «Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море», представленную на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.28 – Океанология

Диссертационная работа А.В. Зимина посвящена исследованию пространственно-временных закономерностей субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в Белом море, определяемых фоновыми гидрометеорологическими условиями, а также приливной и фронтальной динамикой. Фактическую основу исследований составили систематические контактные наблюдения с высоким пространственным разрешением, выполненные лично соискателем и/или с его участием и спутниковые данные.

Актуальность выбранной темы определяется с одной стороны важностью процессов и явлений в субмезомасштабном интервале изменчивости для понимания взаимосвязей в диапазоне масштабов от синоптического до микроструктурного, а с другой, недостаточной изученностью этих процессов, особенно в морях Северного Ледовитого океана. Гидрофизические процессы с временным масштабом от долей часов до суток и пространственным масштабом несколько километров (напр. внутренние волны, вихревые и струйные структуры, фронтальные разделы и др.) в значительной степени формируют изменчивость течений, тонкую термохалинную структуру вод и вносят вклад в вертикальное и горизонтальное перемешивание вод. Географическим объектом исследования не случайно выбрано Белое море, где интенсивный полусуточный прилив является ключевым фактором, определяющим регулярность и специфические особенности явлений и процессов на отдельных акваториях. Несмотря на то, что Белое море, вероятно можно отнести к наиболее изученным морям российской Арктики, вопрос о роли короткопериодной изменчивости в формировании наблюдаемой структуры вод исследован недостаточно. Это в частности связано с отсутствием надежных, основанных на комплексных наблюдениях оценок коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена, учитывающих влияние субприливных процессов, что необходимо для верификации результатов численного моделирования. С учетом этого, разработка

технологии исследований (подробно описанной в разделе 1.3), отвечающей сформулированным целям и сочетающей методы специализированных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений оправдано является базовым этапом работы, необходимым для последующего содержательного анализа собранных натуральных данных и ответа на поставленные в диссертации научные вопросы. Сформулированный автором концептуальный подход, в рамках которого постулируется принципиальная общность субмезомасштабных структур, как связующего энергетического звена между генерацией (приливы) и диссипацией (микроструктура) представляет несомненную методологическую ценность как теоретическая основа выполненных экспериментальных исследований. В отдельных главах диссертации соискатель подробно анализирует собранные натурные данные в контексте изучения специфических субмезомасштабных процессов (внутренние волны, вихри, фронты). Очевидным достоинством диссертации является обобщение результатов исследования в контексте влияния субприливной изменчивости на горизонтальный и вертикальный обмен. В целом, необходимо подчеркнуть, что сформулированная автором цель диссертации: «установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в Белом море», безусловно, является актуальной, а полученные результаты - новыми. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации 235 стр., включая 70 рисунков и 29 таблиц.

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена его научная новизна, научная и практическая значимость, дана оценка достоверности полученных результатов, и приведены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях по теме диссертации и о структуре диссертации.

В первой главе описаны масштабы изменчивости гидрофизических полей, дан подробный обзор изученности процессов на масштабах полусуточного приливного цикла и менее в Мировом океане, приведены сведения о морфометрии дна, динамике, структуре вод и изменчивости термодинамических полей Белого моря, рассмотрены методы мониторинга короткопериодной изменчивости гидрофизических полей и процессов. В качестве несомненного достоинства данной главы (являющейся в значительной степени информационно-вспомогательной), следует отметить системность изложения материала и выделение положений, которые затем более подробно рассматриваются в последующих главах на основе результатов, полученных автором и/или при его непосредственном участии. В частности, выдвигается основная гипотеза исследований, что в качестве

механизма, запускающего каскад передачи энергии от процессов синоптического масштаба и мезомасштаба к микроструктуре в Белом море, выступают полусуточные приливы. В рамках этой гипотезы, взаимодействие приливных движений со стратификацией вод и донной топографией способствует формированию и разрушению элементов субмезомасштабной структуры вод (внутренних волн, вихрей и др.) и через это оказывает влияние на интенсивность горизонтального и вертикального турбулентного обмена. В разделе 1.3 подробно описаны принятые в настоящее время методы мониторинга гидрологических полей и проанализированы их достоинства и недостатки применительно к цели данного исследования. На основании выполненного анализа обосновывается целесообразность применения комплексной системы наземных и спутниковых наблюдений для мониторинга короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море. Детальное описание разработанной системы мониторинга логически завершает первую главу.

Во второй главе представлены и проанализированы количественные параметры изменчивости гидрофизических полей и тонкой термохалинной структуры вод на субприливных временных масштабах в характерных районах Белого моря, различающихся по гидрологическим условиям. В первых двух разделах главы систематически изложены результаты наблюдений за температурой, соленостью и скоростью течения на автономных буйковых станциях. Различные районы моря, различающиеся по типу плотностной стратификации, классифицированы по частотным характеристикам колебаний и амплитудам изменчивости термохалинных параметров. С применением спектрального анализа выделены энергонесущие частоты колебаний на периодах меньше приливного. Делается вывод, что максимальный вклад колебаний с периодом менее 2 часов (до 40 % от общей дисперсии) наблюдается в мелководных районах моря с двухслойной структурой вод около фронтальных зон. В заключительном разделе главы 2 рассмотрены результаты измерений тонкой термохалинной структуры и выполнен статистический анализ выявленных неоднородностей с помощью методов, изложенных в работах К.Н. Федорова. По результатам анализа делается вывод, что на большей части акватории моря наиболее интенсивные тонкоструктурные колебания на профиле температуры наблюдаются в зонах максимальных вертикальных градиентов термохалинных параметров.

Третья глава посвящена исследованию короткопериодного внутреннего волнения в характерных районах моря, выделяемых по гидрологическим условиям. Для анализа использованы данные контактных измерений, спутниковые наблюдения и климатическая информация. На основе анализа контактных наблюдений сделан вывод о доминировании

в спектре волн приливных периодов и короткопериодных внутренних волн, превосходящих модельный спектр Гарретта - Манка, но совпадающих с ним по закону спада. Закономерности пространственного распределения характеристик внутренних волн по акватории моря проанализированы в разделе 3.2 на основе обработанных спутниковых снимков, позволяющих проследить проявление внутренних волн на поверхности моря. Для калибровки спутниковых снимков под руководством соискателя был проведен подспутниковый эксперимент, целью которого было описание по данным контактных измерений характеристик короткопериодных внутренних волн в течение приливного цикла и сопоставление со спутниковыми снимками радиолокаторов (РЛ) с синтезированной апертурой. В разделе 3.2 подробно описан выполненный эксперимент и обсуждены его результаты. Эффективность спутниковых РЛ снимков для прослеживания фронтальной динамики наглядно проиллюстрирована на рисунках 3.7 и 3.8, где надежно выделяется фронтальный раздел, разделяющий баренцевоморские воды от вод центрального бассейна Белого моря. Из сопоставления характеристик внутренних волн, определенных по двум типам наблюдений, соискатель делает вывод об их хорошем соответствии, что позволяет рассматривать спутниковые снимки, в качестве достаточно надежного источника информации о пространственном распределении характеристик внутренних волн на больших акваториях. Наиболее значимым результатом выполненного в данной главе комплексного анализа следует считать выявление широкого распространение короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря и достоверные количественные оценки их статистические характеристик. Проведено районирование акватории моря по частоте регистрации волн и их параметрам, выделены наиболее вероятные зоны генерации волн.

В четвертой главе исследуются субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальные разделы Белого моря. По данным контактных измерений и спутниковой информации определяются физические параметры этих структур, особенности пространственного распределения, оцениваются характеристики сезонной, синоптической и мезомасштабной динамики, анализируются возможные взаимосвязи между фронтальной динамикой, субмезомасштабными вихрями и короткопериодными внутренними волнами. На основании анализа данных контактных наблюдений, высказано предположение, что основной причиной возникновения циклонических внутривихревых вихрей с диаметром от 1 до 8 км является трансформация приливного потока над неоднородным дном, тогда как более крупные вихри (около 10 км в диаметре) генерируются ветром и приливами, создающими возмущения в сдвиговых потоках на фронтальных разделах. Распределение зарегистрированных вихрей по масштабам хорошо согласуется с

соответствующими величинами бароклинного радиуса Россби, меняющегося на акватории моря от 1 до 8 км. Важной особенностью выполненного анализа фронтальной и вихревой динамики была привязка к синоптическим условиям, что следует считать совершенно необходимым условием для получения адекватных результатов, особенно в мелководных районах моря. В частности, в разделе 4.2 установлено, что основными факторами синоптической изменчивости положения и характеристик поверхностных фронтальных разделов являются атмосферные воздействия и сизигийно-квадратурный цикл. Существенным при этом является то, что неравномерность стока влияет не только на расположение и интенсивность соответствующих стоковых фронтов, но и на параметры приливных фронтов. Сформулированные базовые положения о динамике фронтальных разделов детально проиллюстрированы данными повторяющихся наблюдений в конкретных районах (напр. рис. 4.9, 4.11, 4.13 и сопутствующий текст). В разделе 4.3 синтезированы результаты первых двух разделов главы 4 с целью выявления возможных взаимосвязей между динамикой фронтальных зон и вихревой активностью. Основываясь на известных из теории и наблюдений механизмах вихреобразования, автор делает вывод, что генезис большинства выявленных субмезомасштабных вихрей связан с возмущениями положения фронтов и характеристик фронтальных разделов под влиянием структурообразующих процессов. Также вполне убедительно звучат рассуждения автора о связи короткопериодных явлений и субмезомасштабных структур с фронтальной изменчивостью. Они основаны на полученных ранее результатах, что пик внутриволновой активности приходится на август, вихревой активности – на июнь-июль, а максимум средних градиентов температуры поверхности моря вдоль стоковых фронтов (Двинского и Онежского) - на первую половину июля, а шельфово-приливных (Горловского и Соловецкого) – на середину августа. Из сопоставления этих фактов делается вывод, что повышение вихревой активности происходит на пике формирования стоковых фронтов, когда сезонный прогрев верхнего слоя ещё не достиг своего максимума. В пользу подобного утверждения свидетельствует то, что большинство вихрей отмечалось в Двинском заливе в период наибольшей изменчивости поверхностного фронта в этом районе. Когда в середине августа сезонный термоклин полностью сформирован, и фронтальная динамика в основном реализуется через меандрирование, возрастает интенсивность генерации короткопериодных внутренних волн.

В главе 5 исследованы особенности пространственного распределения рассчитанных по данным наблюдений коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости и диапикнической диффузии и проанализировано влияние на величины коэффициентов субприливных процессов и связанных с ними явлений. Для расчета

инвариантных статистических характеристик турбулентности использовался метод Эртеля, алгоритм которого подробно изложен в разделе 5.1. Установлено, что значения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости в среднем составляют $10 \text{ м}^2/\text{с}$ за приливной цикл с наиболее интенсивным горизонтальным обменом в районе Горла, где значения коэффициента горизонтального обмена на порядок превышают средние значения. Анализируя полученные расчетные значения, автор делает вывод, что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах, где наблюдается интенсивная субмезомасштабная вихревая активность и/или повышенная частота короткопериодных внутренних волн. В разделе 3.2 рассчитаны оценки вертикального турбулентного обмена в различных районах моря при наличии в данных короткопериодных явлений и в их отсутствии. Диапазон рассчитанных значений коэффициентов диапикнической диффузии составляет $10^{-4} - 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$, причем наибольшая интенсивность вертикального обмена наблюдается в районах с частой регистрацией короткопериодных внутренних волн, что говорит о значительном вкладе субмезомасштабных процессов в вертикальное перемешивание.

В Заключении перечислены основные результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований. Для каждой из глав и разделов диссертации указаны конкретные выводы. Основные научные выводы работы в сжатом виде сформулированы в автореферате.

В целом, представленная к защите диссертационная работа производит весьма позитивное впечатление. Помимо описания оригинальных результатов, в диссертации проведен подробный обзор публикаций по тематике работы и смежным областям, что характеризует соискателя как эрудированного специалиста не только по тематике результатов, представленных на защиту, но и по физической океанографии в целом. Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Положения, выносимые на защиту, составляют оригинальный научный результат, который может быть квалифицирован как решение актуальной научной проблемы. Полученные автором выводы достоверны, и обоснованы анализом, содержащимся в диссертационной работе. Основные результаты диссертации опубликованы в 17-ти статьях и подтверждены 16-ю свидетельствами о регистрации прав интеллектуальной собственности. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Диссертационная работа выгодно отличается своей целостностью, способностью автора выполнить крупное научное исследование, от сбора и синтеза экспериментальных

данных, их обработки с применением современных методов анализа до глубокого обобщения полученных результатов. Результаты работы могут найти непосредственное практическое применение в научных учреждениях Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России и Российской Академии наук, занимающихся исследованием и освоением Арктики. Работа базируется на обширном фактическом материале, значительная часть которого была получена при непосредственном участии автора. Диссертация написана ясным языком, грамотно и аккуратно оформлена. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Текст диссертации не лишен ряда незначительных недостатков:

- Учитывая широкий спектр вопросов, затронутых в диссертации, высокая степень подробности выводов вполне логична. Однако, в заключении было бы целесообразно обобщить сделанные выводы и кратко сформулировать наиболее значимый результат выполненного исследования, отвечающий поставленной цели.
- С моей точки зрения большое количество таблиц, размещенных непосредственно в тексте, мешает восприятию материала, поскольку частое переключение внимание с текста на цифровую информацию отвлекает внимание. Логичнее было бы какую-то часть таблиц привести в приложения, а в тексте оставить обобщенные выводы, кратко описывающие основное содержание соответствующей таблицы.
- Некоторые рисунки не информативны в черно-белой гамме. Например, рис. 2.2 совершенно не читается, поскольку символы сливаются друг с другом. Логичнее было бы привести его в цвете.
- Ряд предложений в автореферате неудачно сформулированы. Например, на стр. 21 автореферата сказано: «Большая часть тонкой структуры формируется под влиянием процессов, связанных с адвективными процессами, неудовлетворяющими условиям изопикничности». Смысл фразы в принципе понятен, но звучит она несколько нелепо.

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Следует особо отметить, что в тексте диссертации проведенные автором исследования описаны очень подробно, содержится большой объем фактического материала, а большинство иллюстраций выполнено на высоком уровне и существенно помогают в восприятии содержания работы. Считаю, что диссертационная работа Зимина Алексея Вадимовича «Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук

по специальности 25.00.28 – Океанология, а ее автор заслуживает присвоения ему
искомой степени.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник отдела взаимодействия океана и атмосферы
ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
доктор физико-математических наук



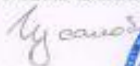
Владимир Владимирович Иванов

05 сентября 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт»

199397, Санкт-Петербург
ул. Беринга, д. 38
тел.: +7 (812) 337-31-23
эл. почта: vladimir.ivanov@aari.ru

Подпись В.В. Иванова удостоверяю
Ученый секретарь ФГБУ «ААНИИ»,
кандидат физико-математических наук



Мария Андреевна Гусакова