

Отзыв

**официального оппонента на диссертацию Марковой Натальи Владимировны
«Исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе
численного моделирования», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
25.00.28 - Океанология**

Рецензируемая работа посвящена весьма актуальной теме, связанной с глубоководным гидрологическим режимом Черного моря и дело не только в недостаточной изученности режима глубоководной циркуляции вод черноморского бассейна, а проблема еще и в том, что данный вопрос тесным образом связан с процессами обмена по вертикали, что для Черного моря особенно важно. Наличие или отсутствие сложной гидрологической структуры по вертикали напрямую влияет на продукцию турбулентной энергии, развитие внутренних волн, процессы адвекции, т.е., те процессы, которые определяют обмен по вертикали. В связи со сказанным актуальность работы несомненна.

Работа состоит из трех разделов, заключения, довольно обширного списка литературы и полезного приложения, где некоторые важные схемы и поля приведены в более воспринимаемом виде.

В начале работы и в Разделе 1 выполнен анализ имеющихся в настоящий момент натурных данных о глубоководных измерениях течений. Несколько озадачивает столь малое число выполненных глубоководных станций с измерениями течений, всего 25, из них 18 станций приходится на советский период и имеется только 7 станций уже в 2016 году выполненных с помощью доплеровского измерителя течений. Этого безусловно недостаточно, даже учитывая имеющиеся в настоящее время данные 10-летнего цикла измерений с помощью буйв АРГО.

Поэтому вполне обосновано решение автора основным методом исследований выбрать численное моделирование, использующее существенно более обширный массив данных и возможности высокоточной численной интерполяции и экстраполяции данных.

Тем не менее, анализ имеющихся натурных данных аккуратно выполнен в работе и получены результаты, подтверждающие имевшиеся представления о циклонической общей циркуляции вод в верхнем слое и об отсутствии замкнутой антициклонической системы циркуляции ниже 500 м. Сделанные выводы подтверждаются и данными измерений выполненные с помощью зондирующего комплекса «Аквалог», которые подтвердили наличие периодических узких вдольбереговых течений антициклонического характера. К анализируемым расчетам по динамическому методу при положении нулевой поверхности на уровне 500 м, когда данный уровень принят за границу глубинной циркуляции надо относиться с осторожностью.

Несмотря на незначительное количество обработанной натурной информации о глубоководных течениях данная информация носит принципиальный характер и может опровергаться только прямыми измерениями.

Раздел 2 является в некотором смысле ключевым, где собственно и ставится задача численного моделирования всей трехмерной нестационарной структуры вод Черного моря. Важно, что в данном случае имеется уже обширный осредненный материал о температуре и солености по всей толще моря, хорошо подготовленный и проверенный.

Здесь важна постановка задачи. К сожалению, автор никак не описывает собственно физическую постановку, что всегда полезно, да и задача совсем не простая, - о глубинной циркуляции. Например, никак не обсуждается возможность описания синоптических вихрей, называемых в данной работе везде мезомасштабными независимо от оценок внешнего и внутреннего радиусов деформации, или же от их размеров в десятки километров или же сотни километров.

Необходимо также заметить, что кинематическое условие должно ставиться на уровне поверхности моря, т.к. это, по существу, уравнение движения по Лагранжу, где координата z заменена на обозначение ζ . Полезно помнить также, что в этом случае частица жидкости не может покинуть уровеньную поверхность, что иногда существенно для физики.

Добавление в правые части уравнений переноса тепла и солей источников ньютоновского типа, связанных с процедурой ассимиляции натурных данных приводит к коррекции гидродинамически согласованного решения на каждом шаге по времени с очевидными в этом случае следствиями. Полезно было бы рассмотреть варианты 4DVAR постановки, когда выполняется с использованием процедуры ассимиляции вариация краевых условий, без коррекции собственно решения, которое в этом случае уже удовлетворяет исходной системе с сохранением необходимой гладкости решения.

И последняя рекомендация по постановке – полезно выполнять для указанной задачи расчет с использованием функции придонного давления, что позволило бы рассматривать глубоководную циркуляцию в терминах поля изолиний давления, что существенно проще, чем анализ векторного поля. Погрешность расчета глубинной циркуляции была бы точнее за счет исключения из правой части уравнения для давления разности больших слагаемых, связанных с интегралами от плотности. Кстати, такой подход поддерживал также в свое время В.Ф. Козлов, создавший сильную школу по геофизической гидродинамике на востоке нашей страны.

Сказанное выше носит характер рекомендаций, и только, что и показывает анализ полученных результатов. Тем не менее некоторые замечания могут быть полезны при дальнейшей работе.

Полученные поля климатического характера аккуратно анализируются автором. При этом автор справедливо отмечает, что наиболее важным результатом является рассчитанное поле течений, которое, как сказано выше, совершенно не обеспечено необходимым для анализа числом натурных измерений. О преимуществах численного моделирования в данном случае говорит более детальная картина рассчитанных гидрологических полей по сравнению с исходным климатическим массивом, эти результаты подтверждены другими работами. Имеются ввиду, например, заток более соленых босфорских вод, аномалии солености в районе Батумского антициклона и на северо-западном шельфе (рис.2.3).

Очень интересен результат о заполнении циклонических вихрей относительно теплыми глубинными водами и, наоборот, антициклонических вихрей холодными водами из промежуточного слоя. Этот, на первый взгляд, просто интересный результат может иметь следствие, состоящее в быстром относительно стандартных условий заполнении вихревых образований, статистика которых может иметь прямое отношение к выстраиванию более сложной глубинной циркуляции вод.

Выполненный анализ и выводы по расчету климатической циркуляции обоснованы сравнением с натурными данными и результатами расчетов других авторов.

Хорошо и подробно описаны особенности циркуляции вод по всей толще и, отметим еще раз, что такие результаты могли быть получены в данной ситуации только численным моделированием, что и отмечает сам автор.

В Разделе 3 приведен анализ численных расчетов выполненных в других работах без технологии ассимиляции натурных данных непосредственно в системе уравнений, проанализированы результаты реакции гидрологических полей Черного моря на прохождение тропического урагана в сентябре 2005 г. и рассмотрены результаты т.н. реанализа за два периода (соответственно, за 10-летний и 21-летний).

Первые из указанных расчетов расчеты названы прогностическими. Сама формулировка такой задачи полезна. К сожалению, недостаточно подробно изложена собственно постановка задачи. В частности, технология подготовки начальных условий, важная для такой задачи. Говорится о процессе геострофического приспособления исходных полей. При этом остается неясным как проходит такой процесс, т.к., он связан с генерацией инерционно-гравитационных волн, которые должны бы покидать область расчета, унося избыточную энергию, что неясно, при, как сказано, «зафиксированных граничных условиях».

Результаты расчета сравниваются с данными буев АРГО, в целом, подтверждающими достоверность полученных результатов. Улучшенное пространственное разрешение в расчетах до 1.6 км дает ожидаемый результат. Существенно выросла вихревая активность, выше скорости течений. Больше отмечено случаев глубинной антициклонической циркуляции, в частности, на уровне 1100м, расчет 2006 г, (рис.3.2), и особенно на рис.3.3, на уровне 1100 м, расчет 2011г., на рис.3.4, расчет 2013 г., возникающих в холодный период года.

Учитывая прогностический характер выполненных экспериментов полученные здесь результаты и их анализ заслуживают высокой оценки.

Автор выполняет анализ результатов, в том числе, т.н., реанализа, выполненного в работе В.Л. Дорофеева и Л.И. Сухих. Исследуется глубоководная циркуляция за 21- летний период для целей данной работы. Описаны входные данные по атмосферному форсингу и спутниковой информации. Анализ данных расчетов выполнен для среднесуточных и среднемесячных полей. Из анализа среднесуточных данных следует, что в целом доминирует циклоническая глобальная циркуляция по всей толще и имеет место вихревая активность с характерными размерами 200-300 км.

Безусловно одним из наиболее интересных и важных результатов является анализ численного расчета воздействия тропического циклона, вышедшего в акваторию Черного моря в конце сентября 2005 г, на гидрологическую структуру и, в особенности, на глубоководную циркуляцию вод Черного моря. Данный расчет выполнен с участием автора. Роль экстремальных режимов, как и везде, очень важна в геофизической гидродинамике. С учетом наблюдаемых вариаций климатической системы разного рода экстремальные ситуации могут случаться чаще. В Черном море интенсивность обменных по вертикали процессов в таких ситуациях может существенно превышать обычные значения. Скорость ветра в циклоне размером порядка 100 км достигала 25-30 м/сек. В работе использовалась версия численной модели, используемая для прогностических расчетов с горизонтальным разрешением 5 км и шагом по времени 1 минута. Важные в данной постановке поля касательного напряжения трения ветра из региональной атмосферной модели (MM5) Государственного Университета Пенсильвании для периода прохождения тропического циклона линейно интерполировались на каждый шаг по времени.

Воздействие штормового ветра привело к формированию мощного циклонического вихря в юго-западной части моря, в центре которого понижение уровня составило 30 см, скорости течений на поверхности превысили 150 см/сек. Из постановки задачи неясно учитывалось ли прямое воздействие атмосферного давления, что могло бы существенно повлиять и на глубинную циркуляцию в том числе. «В центре западной части моря существенно усилился процесс подъема глубинных вод....Наряду с подъемом вод имело место мощное перемешивание, которое привело к попаданию на поверхность моря вод, находившихся под ХПС (*холодный промежуточный слой*) до начала действия атмосферного циклона»... «Процесс подъема холодных вод в центре вихря сопровождался опусканием теплых вод по его периферии со скоростью примерно 10 м/сутки». Указанные процессы привели к существенной перестройке термохалинной структуры вод в данном районе моря. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением расчетного поля температуры поверхности моря со спутниковыми данными, рис. 3.11.

При анализе воздействия тропического циклона на глубоководную циркуляцию автор указывает, что – «Вследствие распространения ветрового импульса вглубь моря скорости течений усиливались на всех горизонтах». Трудно согласиться с таким механизмом для всей толщи моря для столь малого периода. На глубинную циркуляцию могла повлиять баротропная компонента течений, связанная с существенными горизонтальными отклонениями уровня в данном случае.

Скорости глубоководных течений в зоне действия циклона превысили климатические в 4-7 раз, и максимальная скорость составила 22 см/сек. Поскольку тропический циклон вышел на юго-западную часть Черного моря, то это не привело к существенной перестройке направления общей циклонической циркуляции в данном районе.

Выполненный расчет и его анализ – это весьма существенный результат по оценке воздействия экстремальных атмосферных воздействий на гидрологический режим Черного моря и его глубоководную циркуляцию.

Часть 3.6, Раздела 3 в некотором смысле суммирует и сравнивает результаты всех выполненных численных расчетов с данными натурных измерений. В частности, уточняется положение верхней границы течений антициклонической направленности. Весьма полезным оказывается сравнение полученных результатов с численными расчетами, выполненными другими авторами.

Выполненный здесь анализ позволяет автору высказать гипотезы о формировании глубоководных течений Черного моря. Возможные механизмы, связанные с формированием элементов глубинной антициклонической циркуляции вод, в частности, из-за сложного атмосферного воздействия или, например, совокупного эффекта возникающих антициклонических вихрей, по - видимому, имеют место, но из совокупного анализа обширного материала выполненного автором следует, что «... говорить о какой-либо одной конкретной причине формирования нерегулярных противотечений в глубинных слоях при текущем уровне обеспеченности данными натурных наблюдений затруднительно». Следует согласиться с этим важным выводом автора.

В заключении автор приводит 9 основных результатов работы, которые в, принципе, можно свести к следующему утверждению: автором выполнен полный и качественный анализ большинства доступных массивов данных о циркуляции вод Черного моря и, в первую очередь, о его глубинной циркуляции и гидрологической структуре, включающих все доступные базы натурных данных, значительную часть данных, полученных численным моделированием в рамках различных постановок задач, причем автор лично принимала

участие в ряде таких расчетов. Можно говорить о том, что выполненный анализ уникален и может быть использован разными специалистами для решения своих конкретных задач.

Работа безусловно фиксирует наши современные знания о гидрологии Черного моря и, в первую очередь, наши представления о её глубинной циркуляции.

Но надо двигаться дальше и потому по ходу изложения рецензентом сделаны замечания, в форме пожеланий, часто не имеющие прямого отношения к автору и не влияющие на результаты работы.

Результаты диссертации были широко представлены на научных семинарах и конференциях. По результатам работы опубликовано 56 статей, среди которых 8 удовлетворяют требованиям ВАК, из них 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы SCOPUS и WEB of Science.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что данная диссертация, безусловно, удовлетворяет всем требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Маркова Наталья Владимировна, заслуживает присуждения искомой степени по специальности 25.00.28 – Океанология.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник

Лаборатории морских течений

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук,

доктор физико-математических наук

Семенов Евгений Васильевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
117997, Москва, Нахимовский проспект, д.36,
тел. +7 (499) 129-23-63, + 7 (929) 640-08-83
e-mail: oceanmod@yandex.ru

10 марта 2021 г.

Подпись Е. В. Семенова УДОСТОВЕРЯЮ:

Ученый секретарь

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Институт океанологии

им. П.П. Ширшова

Российской академии наук

кандидат географических наук



А. С. Фалина