

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА на диссертационную работу 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.

В настоящее время значительно увеличилось количество данных гидрометеорологических наблюдений за состоянием морей и океанов, а возросшие мощности компьютерной техники позволяют обрабатывать и усваивать огромные массивы данных наблюдений за температурой и соленостью морской воды. На основе численной гидродинамической модели можно получить характеристики температуры, солености, скорости течения во всей толще океана или моря. Натурные данные наблюдений сосредоточены в верхней части моря, а на глубинах более 300 м их очень мало. Новые данные на глубинах поступают в основном от дрейфующих буев-профилемеров, организованных в систему ARGO. По данным наблюдений буи дрейфовали как в циклоническом, так и в антициклоническом направлениях. В настоящее время нет сложившегося представления о характере глубоководной циркуляции Черного моря. В то время, как точно установлено, что в верхнем слое моря присутствует Основное Черноморское Течение циклонической направленности, неизвестно, присутствует или нет под ним противотечение. Поэтому **актуальность** представленной работы, посвященной исследованию особенностей глубоководных течений в Черном море, не вызывает сомнений. Диссертация вносит значительный вклад в ответ на вопрос о характере глубоководной циркуляции воды в Черном море.

Целью работы является исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе результатов численного моделирования.

Для расчетов скорости течений используется верифицированная трехмерная численная модель динамики Черного моря МГИ, **достоверность** расчетов по которой подтверждается сопоставлением с данными натурных наблюдений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что установлено, что на фоне общей циклонической глубоководной циркуляции существуют течения антициклонической направленности и указана их локализация. Выводы получены на основе диагностических и прогностических расчетов. Расчеты климатической циркуляции выполнены по гидродинамической модели с пространственным разрешением 5 км с усвоением климатического массива данных наблюдений температуры и солености, подготовленного Белокопытовым. Кроме диагностических расчетов выполнялись прогностические расчеты, в том смысле, что расчетные температура и соленость никак не корректировались наблюдениями. Расчеты выполнены по гидродинамической модели с пространственным разрешением 1,6 км для 2006, 2010, 2011 и 2013 годов. По прогностическим расчетам подтверждено наличие узких течений антициклонической направленности вдоль материкового склона Черного моря.

Впервые показано влияние на трехмерную структуру вод Черного моря экстремального атмосферного циклона, прошедшего над морем 25–29.09.2005 г. Установлено, что отклик моря в области действия атмосферного циклона выражался в образовании циклонического вихря в море с мощным апвеллингом в центре, интенсификации струйного течения вдоль границ бассейна, и существенном (в

несколько раз, до 15–20 см/с на глубоководных горизонтах) увеличении скорости течений в зоне действия вихря.

По данным наблюдений подтверждено существование глубоководных течений антициклонической направленности, полученных в расчётах и распространяющихся под основным пикноклином вдоль северокавказского побережья. Для этого собраны, обработаны и проанализированы данные натурных наблюдений в исследуемом районе: данные глубоководных СТД–наблюдений в 1997–2008 гг. на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик», данные наблюдений буев ARGO, рассмотрены данные глубоководного профилирования скорости течений с помощью зондирующего комплекса «Аквалог» в июне 2011 г.

На защиту выносятся положения, полученные в результате расчетов по верифицированной гидродинамической модели, подтвержденные данными натурных наблюдений.

Диссертация Н. В. Марковой состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений, списка используемой литературы и приложения.

Первый раздел посвящен глубоководным течениям Черного моря, полученным по данным наблюдений. В первом подразделе рассматриваются работы различных авторов, посвященные течениям Черного моря. В настоящее время считается, что направление глубоководной циркуляции совпадает с направлением циркуляции в верхнем слое. Но в некоторых современных работах делаются выводы о наличии глубоководного противотечения антициклонической направленности под ОЧТ. Выводы о существовании антициклонической циркуляции бассейнового масштаба делаются, как на основе натурных данных, так и на основании моделирования. Например, проведенный в МГУ на основе Бергенской модели эксперимент показал наличие в Черном море противотечения в климатических полях на глубинах более 1300 м во все сезоны. Глубоководные течения антициклонической направленности фиксировались также в недавних результатах моделирования климатических полей Черного моря по модели ИВМ, прогностических расчетах с помощью моделей INMOM и NEMO, в ре анализе на основе модели МГИ.

В следующем подразделе рассматриваются данные измерений глубоководных течений из банка данных МГИ. По этим данным получено, что направления глубоководных течений в точках наблюдений часто не совпадают с направлениями течений в верхнем слое, на некоторых станциях направление течений с глубиной изменяется на противоположное, а на других станциях направление течений оказывается постоянным по глубине. При этом значения не только мгновенных скоростей, но и средних характеристик скорости – даже с учетом фильтрации верхних 25 % исходной выборки – оказываются довольно существенными. На ряде станций обнаруживается увеличение скоростей течений на глубинах более 500 м.

В третьем подразделе скорости глубоководных течений определяются на основе другого архива данных – 10-летнего массива измерений автономных буев-профилемеров ARGO, находящегося в открытом доступе. Рассмотрение данных регулярных станций, выполненных в 2005–2015 гг. 16 буями ARGO, показало, что общее направление движения буев в окрестностях их парковочных глубин 450, 500, 750, 1000, 1300 и 1500 м соответствует циклоническому характеру бассейновой циркуляции. Расчет средних скоростей на основе данных глубоководных буев ARGO не показал наличия течений антициклонической направленности на глубинах 350–1600 м. Однако присутствие нерегулярных юго-восточных течений (антициклонической

направленности) вдоль северо-восточного свала глубин установлено по данным одного буя ARGO с парковочной глубиной 200 м, а также по результатам обработки измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик», представленным в четвертом подразделе.

Второй раздел посвящен расчету климатических полей на основе 3-мерной нелинейной z-координатной модели динамики Черного моря МГИ с горизонтальным разрешением 1,6 км и 45 вертикальными горизонтами. Для усвоения данных в уравнениях температуры и солености присутствуют источниковые члены, которые притягивают расчетные значения к наблюдаемым. Усваиваемые в модели поля температуры и солености были получены Белокопытовым на основе статистически обработанных многолетних натуральных наблюдений. Эти данные были интерполированы на пространственную сетку модели, по ним были рассчитаны коэффициенты Фурье и восстановлены поля температуры и солености на каждые сутки года. Температура и соленость усваивались в модели периодически (через каждые 3 ч).

Исходный массив, полученный на основе многолетних наблюдений, содержит данные о температуре и солености с дискретностью по пространству 20' по широте и 30' по долготе, а по времени среднемесячные данные для слоя 0–300 м и среднегодовые – на больших глубинах.

Время достижения квазипериодического режима было максимальным на нижних горизонтах и составило приблизительно 1000 суток. (Рисунок 2.1 – Плотность средней кинетической энергии на горизонте 2100 м). Кинетическая энергия глубоководных течений изменяется в течение года в диапазоне от 0,025 до 0,125 Дж/м³. По модели получена большая сезонная изменчивости скорости течения на глубине 2100 м, при этом поля температуры и солености глубже 300 м среднегодовые и не имеют сезонной изменчивости. Не обсуждаются причины, вызывающие сезонную изменчивость скорости на глубине 2100 м.

В следующем подразделе рассматриваются особенности термохалинной и динамической структур вод Черного моря в верхнем слое 0-200 м. Максимальные количественные отличия между расчетными и наблюденными значениями температуры не превышают 0,5°C и существуют преимущественно на верхних горизонтах (до 20 м). В модели, как и в наблюдениях, нет сезонных изменений температуры и солености глубже 300 м, но при этом есть сезонные изменения скорости.

На глубине больше 300 м структура климатических течений Черного моря отличается от поверхностной. При сохранении общей циклонической направленности циркуляции, нет единого круговорота бассейнового масштаба.

Большое внимание уделяется антициклоническим образованиям, описывается эволюция скорости течений в Севастопольском антициклоне на глубине 350 м. Весной и летом (с середины апреля по июль) Севастопольский антициклон увеличивается в масштабе примерно в полтора раза, также летом усиливается активность Батумского антициклона. Антициклоническое течение обнаруживается с марта по июль на глубинах более 300 м у кавказского побережья в районе Геленджика.

Глубоководным течениям антициклонической направленности посвящен заключительный подраздел второго раздела работы. Установлено, что на горизонтах 300–800 м (преимущественно в весенне-летний период вдоль северо-восточного свала глубин) возникает узкое струйное течение антициклонической направленности, распространяющееся противоположно вышележащему ОЧТ.

В третьем разделе приводятся результаты расчетов по модели на сетке 1,6 км, по вертикали 27 горизонтов без усвоения в модели данных измерений (Демышев, Дымова, 2015, 2018). Для описания процессов вертикального турбулентного перемешивания используется модель турбулентности Меллора–Ямады. По результатам совместного анализа расчетных данных нескольких прогностических экспериментов (для периодов 2006, 2010, 2011 и 2013 гг.) показано, что общее направление циркуляции в бассейне является циклоническим. В верхнем слое структура поля течений сохраняется до глубины 300 м. На горизонтах 300–500 м еще обнаруживаются отдельные структуры, присущие циркуляции верхнего слоя (глубинные части западной ветви ОЧТ, наиболее крупные мезомасштабные вихри). Струйные течения антициклонической направленности шириной до 10–12 км, распространяющиеся вдоль континентального склона в разных частях Черного моря со средними скоростями 5–8 см/с и максимальными до 15–20 см/с, обнаруживаются по данным прогностических расчетов на горизонтах 1000 м и более

В *подразделе 3.4* на основе данных реанализа гидрофизических полей Черного моря (Дорофеев, 2016), проведенного для периода 1992–2012 гг. на расчетной сетке 4,8 км с усвоением в модели данных измерений о температуре, солености и уровне моря, выполнено исследование среднесуточных и среднемноголетних скоростей течений. Результаты реанализа подтвердили наличие течений антициклонической направленности, квазипериодически формирующихся вдоль свала глубин в районе северокавказского побережья. Формирование течений происходит преимущественно в весенне-летний период и согласуется с ослаблением вышележащего ОЧТ. Расчет средних скоростей для каждого месяца показал, что такие течения образуются на горизонтах более 300 м: с марта их можно обнаружить на глубинах 300–500 м, в мае они заглубляются до горизонта 1000 м, а в июне – до 1500 м

В *подразделе 3.5* исследуется трансформация поля течений под влиянием экстремального атмосферного воздействия – квазитропического циклона, проходившего над ЮЗ частью Черного моря 25–29.09.2005 г. Показано возрастание скоростей в несколько раз на всех горизонтах в зоне действия атмосферного циклона, в том числе – до 15–20 см/с в глубинных слоях

Отмечены отличия в воспроизведении глубоководной динамики, в частности, верхней границы течений антициклонической направленности, которая в прогностических расчетах составляет около 1000 м, а по другим расчетам и наблюдениям находится на горизонтах 250–300 м. Результаты еще одного реанализа гидрофизических полей (Лишаев, 2016) послужили аргументом при уточнении верхней границы таких течений. Реанализ проводился на основе модели МГИ на сетке 5 км с усвоением данных наблюдений температуры и солености согласно разработанному в работах П.Н. Лишаева, В.В. Кныша, Г.К. Коротаева алгоритма адаптивной статистики, учитывающего ошибки измерений ассимилируемых параметров до глубины 500 м. Это позволило авторам воспроизвести реалистичную изменчивость температуры и солености в основном пикноклине. В результате обработки данных реанализа установлено наличие течений антициклонической направленности вдоль северокавказского побережья уже с горизонтов 250–350 м.

Последний подраздел посвящен причинам формирования глубоководных течений, которые пока являются гипотезами.

В заключении сформулированы научные результаты работы.

В своей работе автор выполнил комплексное, законченное научное исследование, основные компоненты которого перечислены выше. Результаты работы имеют важное научно-практическое значение.

Научные положения и выводы достаточно полно отражены в опубликованных работах и обсуждены на международных и отечественных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 56 научных работ, из которых 15 статей в рецензируемых научных журналах. По своему содержанию, полученным результатам и характеру выводов диссертация полностью отвечает специальности 25.00.28 — Океанология.

Диссертация изложена хорошим научным языком. К работе можно предъявить следующие замечания.

1. По модели получена большая сезонная изменчивость скорости течения на глубине 2100 м, при этом поля температуры и солености глубже 300 м среднегодовые и не имеют сезонной изменчивости. Физический механизм сезонной изменчивости скорости течений на глубине 2100 м не объясняется. Необходимо пояснить, какова причина такой большой сезонной изменчивости скорости течения на глубине 2100 м, при этом поля температуры и солености глубже 300 м среднегодовые и не имеют сезонной изменчивости.

2. Со ссылкой на рис. 2.6 обсуждается эволюция глубоководных вихрей, время жизни вихрей, их горизонтальный и вертикальный размеры. Но такие выводы невозможно сделать, исходя из рисунка 2.6, где представлены скорости течений только на 19 июня, нужны дополнительные иллюстрации. Требуется также объяснение, почему по умолчанию считается, что средняя за сезон летняя циркуляция совпадает со среднесуточной 19 июня, а средняя за весенний сезон со среднесуточной циркуляцией 4 апреля.

3. На рисунке 3.17 представлены профили скорости течений в период проведения измерений с помощью «Аквалога». Смена направления скорости начиналась на горизонтах 200–250 м, что близко к результатам моделирования климатических течений и расчету течений динамическим методом на основе СТД–наблюдений на полигоне. Сопоставление с данными прогностических расчетов оказалось неудачным. Смена направления скорости по наблюдениям происходит на 200–250 м, а по расчетам на 940 м. В данном случае прогностическая модель с разрешением 1,6 км работает плохо, хуже, чем динамический метод, скорее всего потому, что модельные поля температуры и солености не соответствуют данным измерений.

4. Основное внимание в работе удалено описанию эволюции скорости глубоководных течений, но при этом не обсуждаются причины, вызывающие эти изменения скорости. Ничего не сказано о преобладающем влиянии солености на скорость течения. Течения рассмотрены в отрыве от температуры, солености, скорости ветра. На одном рисунке температура выступает в роли пассивной примеси, когда причиной изменения температуры является циклоническая циркуляция воды, но причина возникновения самой циклонической циркуляции не обсуждается. К сожалению, только в последнем разделе работы, который называется «о гипотезах формирования глубоководных течений Черного моря» обсуждаются причины глубоководной циркуляции, которые пока являются гипотезами. Почему бы и на протяжении всей работы не только описывать изменения скорости, но и уделить внимание причинам этих изменений.

Выявленные замечания не снижают высокую оценку основных результатов и выводов диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную работу, имеющую высокую актуальность и практическую значимость, ее основные результаты опубликованы в цитируемых изданиях, автореферат хорошо отражает содержание диссертации.

Представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор, Маркова Наталья Владимировна, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 Океанология.

Официальный оппонент
доктор физико-математических
наук, ведущий научный сотрудник
отдела морских гидрологических
прогнозов (ФГБУ «Гидрометцентр
России»)

Попов
Сергей
Константинович
05.03.2021

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»
(ФГБУ «Гидрометцентр России»), г. Москва, 123376, Большой Предтеченский
переулок, д. 13, стр. 1, тел. (499) 252-34-48, e-mail: hmc@mecom.ru

Подпись д.ф.-м.н. Попова Сергея Константиновича заверяю
Директор ФГБУ «Гидрометцентр России»
С.В. Борщ

