

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»,
член-корреспондент РАН

Коновалов С.К.
«17» февраля 2020 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»

Диссертация «Исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе численного моделирования» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – «океанология» выполнена в отделе теории волн Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Маркова Наталья Владимировна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности младшего научного сотрудника отдела теории волн.

В 1997 г. соискатель окончила Симферопольский государственный университет им. М.В. Фрунзе (ныне – Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского) по специальности «Прикладная математика».

Маркова Н.В. окончила в 2000 г. очную аспирантуру Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано 29.12.2016 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Демышев Сергей Германович работает главным научным сотрудником и заведующим отделом теории волн в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По результатам рассмотрения диссертации Марковой Н.В. «Исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе численного моделирования» принято следующее заключение.

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Марковой Н.В. посвящена исследованию особенностей глубоководных течений Черного моря на основе результатов численного моделирования.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется, в первую очередь, недостаточной изученностью глубоководной циркуляции вод Черного моря и отсутствием единого четкого представления о ее характере и структуре.

В диссертационной работе автором применен комплексный подход к решению поставленной проблемы. Для исследования особенностей глубоководных течений Черного моря анализируются результаты численных экспериментов по воспроизведению динамики Черного моря в различные временные интервалы (от нескольких суток до нескольких лет), с разным пространственным разрешением (5 и 1,6 км по горизонтали), с климатическими, реальными и экстремальными атмосферными условиями.

Для сопоставления с результатами численного моделирования используются данные многолетних архивов натурных наблюдений.

Анализ поля течений в глубинных слоях Черного моря проводится по результатам моделирования, выполненного на основе численной модели Морского гидрофизического института РАН (МГИ), при этом используются массивы гидрофизических параметров вод Черного моря, полученные как доктором наук, так и другими исследователями (с корректно оформленными соответствующими ссылками). Данные расчетов этих исследователей не использовались ими для оценки глубоководных течений Черного моря. Объединение данных разных экспериментов в одной работе позволило автору на максимально широкой основе провести обработку и анализ гидрофизических полей и более детально рассмотреть особенности и пространственно-временную изменчивость глубоководной динамики Черного моря.

Трансформация трехмерных гидрофизических полей Черного моря при воздействии на море «квазитропического» циклона ранее не исследовалась и изучается в диссертационной работе впервые.

Используемые в диссертации архивы данных натурных наблюдений для оценки глубоководной циркуляции ранее не анализировались и впервые применяются для ее исследования.

Диссертация Марковой Н.В. «Исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе численного моделирования» по объему выполненных исследований, новизне результатов, научному и практическому значению отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Постановка задач и выбор тематики диссертационного исследования осуществлялись совместно с научным руководителем д. ф.-м. н.

С.Г. Демышевым. Аналитический обзор предшествующих работ по теме диссертации проводился соискателем самостоятельно. Обсуждение результатов отдельных этапов исследования и формулировка выводов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

При моделировании климатической циркуляции вод Черного моря соискателем проведен анализ и установлены особенности гидрофизических полей Черного моря, показано наличие под основным пикноклином мезомасштабных вихревых структур разного знака завихренности и их пространственно-временная изменчивость, обнаружены глубоководные течения антициклонической направленности.

Для подтверждения полученных при расчете климатической циркуляции Черного моря особенностей глубоководных течений соискателем предложена идея совместного рассмотрения результатов ряда численных экспериментов, проведенных для различных временных интервалов, с разным атмосферным форсингом и пространственным разрешением, их анализ и сопоставление с максимальным количеством данных натурных наблюдений.

При обработке данных прогностических численных экспериментов на мелкой сетке (1,6 км) соискатель принимал непосредственное участие в анализе результатов расчетов, подготовке данных измерений буев ARGO и валидации на их основе результатов численного моделирования, в обсуждении и формулировке выводов.

Обработка и анализ полученных ранее данных многолетнего ретроспективного анализа для исследования глубоководной циркуляции Черного моря выполнялись соискателем самостоятельно.

Подготовка и проведение численного эксперимента по моделированию гидрофизических полей Черного моря при прохождении атмосферного «квазитропического» циклона проводились соискателем самостоятельно. Анализ и интерпретация результатов расчета, исследование трансформации

глубоководных течений под воздействием экстремального ветра проводились при непосредственном и активном участии соискателя.

Соискатель принимала непосредственное участие в организации и проведении работ по оценке глубоководных течений Черного моря на основе архивов данных натурных наблюдений (измерений скоростей течений из Банка океанографических данных МГИ, находящихся в открытом доступе данных измерений буев ARGO, а также данных СТД-измерений на Черноморском полигоне «Геленджик» Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН). Совместно с сотрудниками МГИ и ИО РАН соискатель активно работала над формированием планов исследований, анализом и интерпретацией результатов, формулировкой выводов.

Обобщение итогов климатического, прогностических численных экспериментов и ретроспективного анализа, сопоставление с оценками глубоководных течений по данным натурных наблюдений выполнялось соискателем самостоятельно.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Все численные эксперименты, результаты которых рассматриваются в работе, выполнены на основе численной модели динамики Черного моря МГИ. Численная модель МГИ является верифицированным инструментом, способным достоверно воспроизводить циркуляцию черноморских вод. Это подтверждено результатами многочисленных численных расчетов, проведенных ранее в ряде национальных и международных проектов.

Для оценки результатов моделирования глубоководных течений дополнительно были проведены расчеты климатической циркуляции по модели Института вычислительной математики (ИВМ), которые также показали наличие полученных в диссертационном исследовании глубоководных течений антициклонической направленности. В рамках проекта РФФИ 18-05-00353_А «Исследование глубоководной циркуляции Черного моря на основе результатов мультимодельных численных экспериментов и данных натурных наблюдений» (2018–2020 гг.) выполняется

сопоставление результатов численного моделирования глубоководной циркуляции Черного моря на основе четырех численных моделей (МГИ, ИВМ-ИО, INMOM, NEMO) и данных наблюдений. Результаты расчетов по указанным моделям подтвердили наличие схожих особенностей поля скорости на глубоководных горизонтах, в частности, течений антициклонической направленности у северокавказского побережья, которые подтверждаются измерениями.

Результаты расчетов климатических полей и ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря, рассматриваемые в диссертации, получены с усвоением в численной модели данных натурных измерений. Это обеспечило согласованность рассчитанных и наблюденных значений и реалистичность воспроизведенных полей. Результаты прогностических расчетов на сетке 1,6 км были валидированы с использованием данных измерений температуры и солености буев-профилемеров ARGO, что позволило оценить модельные поля как достоверные и исследовать их структуру на глубоководных горизонтах.

Достоверность научных положений и выводов апробировалась на большом количестве научных мероприятий.

Научная новизна результатов проведенных исследований.

Впервые для исследования особенностей глубоководных течений Черного моря проведен комплексный анализ данных климатического и прогностических расчетов, а также ретроспективного анализа на основе модели МГИ и архивов данных натурных наблюдений.

Впервые проведена совместная оценка и статистический анализ данных глубоководных измерений скорости течений Черного моря, полученных в разных рейсах на научно-исследовательских судах в период 1960–2016 гг. и содержащихся в Банке океанографических данных МГИ.

Проведена обработка наиболее полного по сравнению с предыдущими расчетами массива данных наблюдений 16 буев-профилемеров ARGO, дрейфовавших в Черном море в 2005–2015 гг. на горизонтах 450 м и более,

рассчитаны средние скорости движения буев. На основе полученных результатов установлено, что скорости течений под основным пикноклином находятся в диапазоне 3–6 см/с, достигая значений 15–20 см/с. Показано, что значительное количество (20–45%) полученных данных о скорости течений превышает 5 см/с. Подтверждено наличие сезонной изменчивости (зимнего усиления) глубоководных течений и установлена преобладающая циклоническая направленность переноса. Показаны наличие и характерные районы формирования вихревых структур разного знака завихренности и течений, распространяющихся вдоль свала глубин.

Для Черного моря построены трехмерные климатические поля уровня, температуры, солености и скорости течений на каждые сутки года с усвоением данных наблюдений температуры и солености в численной модели МГИ. Они имеют улучшенное пространственное разрешение (5 км по горизонтали) по сравнению с предыдущим (15 км) вариантом климата, что позволило более подробно воспроизвести и исследовать структуру климатических течений в глубинных слоях. Впервые установлено наличие климатических течений антициклонической направленности, распространяющихся вдоль материкового склона.

Впервые проведен сравнительный анализ глубоководных течений Черного моря для разных временных интервалов (климатических полей с годовым периодом, результатов прогностических расчетов гидрофизических полей Черного моря в 2006, 2010, 2011 и 2013 гг. на мелкой сетке 1,6 км и данных 21-летнего реанализа гидрофизических полей). Представлены основные особенности трехмерной структуры глубоководных течений. Установлено наличие узких течений антициклонической направленности вдоль материкового склона Черного моря во всех расчетах, показана их локализация и изменчивость.

Подтверждено на основе анализа архивных данных многолетних глубоководных наблюдений наличие нерегулярных узких струйных течений антициклонической направленности, распространяющихся вдоль

северокавказского побережья на горизонтах 250 м и более, которые были обнаружены по результатам модельных расчетов. Для этого проведена обработка СТД-наблюдений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» и данных буев ARGO, а также рассмотрены данные глубоководного профилирования скорости течений с помощью зондирующего комплекса «Аквалог».

Впервые показано (на примере «квазитропического» циклона 25–29 сентября 2005 г.) влияние экстремального ветрового воздействия на трехмерную динамику вод Черного моря, включая поле течений в глубинных слоях. Установлено, что отклик моря в зоне действия «квазитропического» циклона выражался в образовании циклонического вихря с мощным апвеллингом в его центре, интенсификации струйного течения вдоль границ бассейна, и существенном (в несколько раз) увеличении скорости течений по всей глубине. Показано, что импульсное ветровое воздействие может являться одной из вероятных причин трансформации течений в глубинных слоях.

Практическая значимость результатов проведенных исследований.

Рассчитанный массив климатических гидрофизических полей Черного моря применяется для изучения годового хода гидрологических параметров Черного моря. Он важен для последующего моделирования физических и экологических процессов в бассейне, может служить базисом для комплексных (физико-биологических, физико-химических и т.п.) исследований, а также может быть использован для задания начальных и/или краевых полей при проведении численных экспериментов.

Трехмерные гидрофизические поля Черного моря, реконструированные для периода прохождения над акваторией атмосферного «квазитропического» циклона 25–29 сентября 2005 г., приведшего к приостановке навигации в юго-западной части моря, восполняют недостаток информации о состоянии морской среды во время аномального атмосферного воздействия, когда данные контактных наблюдений практически отсутствовали, а данные со

спутников были малопригодны для исследования вследствие высокой облачности.

В результате комплексного рассмотрения результатов численных экспериментов и обработки данных натурных наблюдений уточнены представления об особенностях поля течений под основным пикноклином Черного моря. Показано, что по всем наборам данных максимальные скорости под основным пикноклином могут составлять до 15–20 см/с. Они достигаются в синоптических/мезомасштабных вихрях и узких струйных течениях, распространяющихся вдоль материкового склона.

Ценность научных работ соискателя.

Ценность научных работ соискателя заключается в разностороннем и наиболее полном на сегодняшний день изложении результатов исследования глубоководных течений Черного моря. Они представлены в 56 научных публикациях, из которых 18 статей в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов и 38 тезисов и материалов научных мероприятий национального и международного уровня. Среди работ автора – научные публикации, посвященные подробному освещению отдельных вопросов глубоководной динамики Черного моря (оценка скорости глубоководных течений на основе данных контактных измерений, анализ результатов численных экспериментов по моделированию гидрофизических полей Черного моря, валидация расчетов с помощью данных натурных наблюдений, детальный анализ региональных особенностей течений под основным пикноклином). Ряд работ соискателя посвящен обобщению результатов собственных численных экспериментов и оценок скоростей глубоководных течений на основе натурных данных и сопоставлению их с полученными другими авторами результатами. По итогам комплексного анализа расчетных данных и результатов натурных наблюдений автором была получена новая информация о структуре и пространственно-временной изменчивости поля скорости под основным пикноклином, расширяющая представления о

глубоководных течениях и трехмерной структуре поля скорости вод Черного моря в целом.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.28 – «океанология», отрасль наук – физико-математические науки.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 56 научных работ, из которых 15 статей в рецензируемых научных журналах [1–15], 3 статьи в рецензируемых сборниках научных трудов [16–18] и 38 тезисов и материалов докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 8 работ [1–8]. В их числе 4 работы [1–4] в рецензируемых научных изданиях, входящих в научометрические базы SCOPUS [1, 4] и Web of Science [2, 3], 2 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук [5, 6] и 2 работы [7, 8] в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №-723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Demyshev S.G. Analysis of the Black Sea climatic fields below the main pycnocline obtained on the basis of assimilation of the archival data on temperature and salinity in the numerical hydrodynamic model / S.G. Demyshev, V.A. Ivanov, N.V. Markova // Physical Oceanography. – 2009. – Vol. 19, Iss. 1. – P. 1–12. – DOI: 10.1007/s11110-009-9034-x

2. Demyshev S.G. Numerical experiments on modeling of the Black Sea deep currents / S.G. Demyshev, O.A. Dymova, **N.V. Markova**, V.B. Piotukh // Physical Oceanography. – 2016. – № 2. – P.38–50. – DOI: 10.22449/1573-160X-2016-2-34-45
3. **Markova N.V.** The Black Sea deep current velocities estimated from the data of Argo profiling floats / N.V. Markova, A.V. Bagaev // Physical Oceanography. – 2016. – № 3. – P 23–35. – DOI: 10.22449/1573-160X-2016-3-23-35
4. Ivanov V.A. Statistical parameters of the Black Sea deep currents based on measurement data / V.A. Ivanov, T.V. Plastun, **N.V. Markova**, A.V. Bagaev // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. – 2019. – Vol. 12, Iss. 4. – P. 49–58. – DOI: 10.7868/S2073667319040063
5. Дымова О.А. Особенности глубоководной циркуляции Черного моря летом 2013 г. / О.А. Дымова, Н.А. Миклашевская, **Н.В. Маркова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2019. – Вып. 1. – С. 40–47.
6. **Маркова Н.В.** Валидация результатов численного моделирования гидрофизических полей Черного моря под основным пикноклином с использованием данных ARGO / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Процессы в геосредах. – 2019. –№ 1(19). – С. 45–50.
7. Демышев С.Г. Моделирование циркуляции в Черном море в сентябре 2005 г. при различных параметризациях турбулентной диффузии и вязкости по вертикали / С.Г. Демышев, **Н.В. Маркова**, Г.К. Коротаев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 26 (2). – С. 8–26.
8. Довгая С.В. Оценка состояния морской среды при экстремальных штормовых условиях в некоторых районах нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений у черноморского побережья Крыма / С.В. Довгая, О.А. Дымова, **Н.В. Маркова**, С.Г. Демышев, Л.В. Черкесов //

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – Вып. 28. – С. 276–286.

9. Демышев С.Г. Региональные особенности климатического поля течений на северо-западном шельфе Черного моря / С.Г. Демышев, **Н.В. Маркова** // Доповіді Національної Академії наук України. – №4. – С. 104–107.

10. Демышев С.Г. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с асимиляцией климатических полей температуры и солености / С.Г. Демышев, В.А. Иванов, **Н.В. Маркова**, Л.В. Черкесов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С. 215–226.

11. Демышев С.Г. Численный эксперимент по моделированию термогидродинамики Черного моря в 2006 г. / С.Г. Демышев, С.В. Довгая, **Н.В. Маркова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 19. – С. 335–369.

12. Демышев С.Г. Отклик гидрофизических полей Черного моря на атмосферный квазитропический циклон 25–29 сентября 2005 г. / С.Г. Демышев, **Н.В. Маркова** // Геоінформатика. – 2010. – №1. – С. 86–92.

13. Демышев С.Г. Особенности глубинной климатической циркуляции Черного моря / С.Г. Демышев, В.А. Иванов, **Н.В. Маркова** // Доповіді Національної Академії наук України. – 2010. – №7. – С. 96–100.

14. Лукьянова А.Н. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: Численные эксперименты на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными Банка данных МГИ РАН / А.Н. Лукьянова, А.В. Багаев, Т.В. Пластун, **Н.В. Маркова**, В.Б. Залесный, В.А. Иванов // Экологическая безопасность

прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ, 2016. – Вып. 3. – С. 9–14.

15. **Маркова Н.В.** Численные эксперименты на основе модели МГИ по исследованию глубоководной циркуляции Черного моря / Н.В. Маркова, О.А. Дымова, С.Г. Демышев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ, 2016. – Вып. 4. – С. 4 –9.

16. Демышев С.Г. Расчет течений в Черном и Мраморном морях с учетом рек и проливов на основе трехмерной нелинейной модели / С.Г. Демышев, С.В. Довгая, О.А. Дымова, **Н.В. Маркова** // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 183–186.

17. **Маркова Н.В.** Термохалинные и динамические особенности климатических полей Черного моря в районе северо-кавказского побережья: анализ результатов моделирования и сравнение с данными наблюдений / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Экология. Экономика. Информатика. Т.2: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Сб. статей. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. – С. 601–608.

18. **Маркова Н.В.** О течениях в зоне континентального склона Черного моря: результаты численных экспериментов / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Экология. Экономика. Информатика. Т.2: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Сб. статей. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2016. – С. 137–146.

Цитирования материалов и отдельных результатов других авторов в диссертации оформлены соответствующим образом. Результаты диссертационной работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

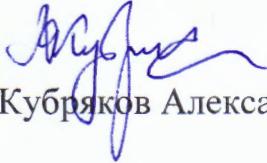
Диссертация «Исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе численного моделирования» Марковой Натальи

Владимировны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – «океанология».

Заключение принято на заседании Общеинститутского научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН».

Присутствовало на заседании 29 членов Общеинститутского научного семинара. Результаты голосования: «за» – 29 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 1 от 12 февраля 2020 г.

Председатель заседания
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук
заместитель директора по научной работе


Кубряков Александр Иванович

Ученый секретарь
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»,
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь

Алексеев Дмитрий Владимирович

17 февраля 2020 года

