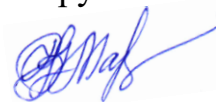


На правах рукописи



**МАРКОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ  
ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.28 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Демышев Сергей Германович

**Официальные оппоненты:**

**Попов Сергей Константинович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», ведущий научный сотрудник отдела морских гидрологических прогнозов

**Семенов Евгений Васильевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории морских течений

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

Защита состоится **22 апреля 2021 г. в 13 ч 00 мин** на заседании Диссертационного совета Д 900.010.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте института [http://mhi-ras.ru/news/thesis\\_defense\\_202009301050.html](http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202009301050.html)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 900.010.02  
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы.** Исследования структуры и изменчивости гидрофизических полей Черного моря, интенсивно проводящиеся в последние годы, фокусируются преимущественно на процессах, происходящих в верхнем его слое – от поверхности до глубин 200–300 м. Глубоководной динамике Черного моря внимания уделяется существенно меньше, и структура течений под основным пикноклином и по настоящее время остается недостаточно изученной. Ключевая причина сложившейся ситуации – значительная ресурсоемкость глубоководных натурных наблюдений и связанный с ней дефицит данных.

До начала интенсивной экспедиционной деятельности в конце 1980-х и проведения новых измерений глубоководная (на горизонтах более 300 м) циркуляция в Черном море полагалась крайне слабой и не обладающей какой-либо изменчивостью. По результатам ряда экспедиций было выполнено описание отдельных глубоководных динамических структур (Murray, 1991; Oguz, 1993; Еремеев, 1996) и установлено наличие межгодовой изменчивости поля скорости под основным пикноклином. В первой для Черного моря работе по расчету скорости течений на основе данных автономных буев-профилемеров (Korotaev, 2006) было показано наличие сезонной изменчивости течений на разных горизонтах. Средние скорости глубоководных течений в Черном море по всем сделанным ранее оценкам находятся в пределах от 1 до 5 см/с.

В настоящее время большинство исследователей придерживается той точки зрения, что направление глубоководной циркуляции циклоническое и совпадает с направлением циркуляции в верхнем слое, где доминирующей динамической структурой является Основное черноморское течение (ОЧТ). Наиболее весомым аргументом в пользу этого послужило отсутствие признаков антициклонической циркуляции в траекториях 3 буев, дрейфовавших в Черном море на глубинах 200, 750 и 1550 м (Korotaev, 2006). Сейчас количество регулярных данных таких буев, организованных в систему ARGO, значительно увеличилось, что позволило в данной работе исследовать этот вопрос более детально.

Вместе с тем, о присутствии в глубинных слоях Черного моря течений антициклонической направленности (противотечений), говорится в ряде работ, выполненных на основе других данных наблюдений (Newmann, 1943; Владимирцев, 1964; Булгаков, 1996; Островский, 2013). Однако, учитывая ограниченность по времени и/или пространству анализируемых массивов измерений, масштабы фиксирующихся процессов не вполне очевидны. Наличие элементов глубоководной антициклонической циркуляции может быть объяснено как наличием противотечения бассейнового масштаба, так и присутствием в районах наблюдений вихревых структур или локальных струйных течений, эволюция которых в целом пока не исследована.

В то же время, мощным средством исследования динамики океана стали современные численные модели. Благодаря прогрессу компьютерных технологий, в начале 2000-х они сделали большой шаг в развитии и продолжают совершенствоваться. Сейчас численные модели могут воспроизводить трехмерную структуру и изменчивость параметров морской среды с адекватной поставленным задачам дискретностью, охватывать огромные пространственные масштабы и работать в опера-

тивном режиме. В опубликованных описаниях результатов численного моделирования также встречаются упоминания о течениях, направленных противоположно вышележащему ОЧТ (Еремеев, 1991; Демышев, 2002, Петренко, 2006; Кордзадзе, 2008; Архипкин, 2013). Однако в большинстве работ, где рассчитывались трехмерные гидрофизические поля Черного моря, акцента на изучении особенностей глубоководной циркуляции не делалось. Целенаправленного и комплексного исследования глубоководных течений на основе результатов численного моделирования, требующего сопоставления с максимально возможным числом накопленных данных глубоководных наблюдений, не проводилось.

Поэтому актуальность данной работы в первую очередь определяется недостаточной изученностью глубоководной циркуляции Черного моря и отсутствием единого четкого представления о ее характере и структуре. Анализ динамики вод Черного моря с помощью современных численных моделей, установление качественных и количественных особенностей глубоководных течений, учет максимального числа данных наблюдений способны не только помочь ответить на отдельные исследовательские вопросы, но и внести вклад в представления о структуре и изменчивости циркуляции вод Черного моря в целом.

**Методология и методы исследования.** Основным методом исследования, применяемым в работе, является численное моделирование. Все расчеты гидрофизических полей Черного моря, результаты которых анализируются в работе, выполнены на основе трехмерной нелинейной модели динамики Черного моря Морского гидрофизического института (Демышев, Коротаев, 1992; Демышев, 2012) (далее – модель МГИ). Исследование особенностей глубоководных течений проводится посредством анализа результатов модельных расчетов (численных экспериментов), выполненных как для климатических, так и для реальных, в том числе экстремальных атмосферных условий. Результаты численного моделирования сопоставляются с данными натурных наблюдений, многолетние массивы которых предварительно обрабатываются и анализируются.

**Цель и задачи исследования.** *Целью* работы является исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе результатов численного моделирования. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. обработать и выполнить анализ данных архивов многолетних натурных наблюдений: измерений скорости течений из Банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН (БОД МГИ), данных судовых STD-измерений на Черноморском полигоне Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) «Геленджик», данных автономных профилирующих буев ARGO;
2. провести моделирование климатических гидрофизических полей Черного моря на основе модели МГИ с горизонтальным разрешением 5 км и ассимиляцией средне многолетних данных наблюдений температуры и солёности; выполнить анализ воспроизведенных полей, выявить особенности глубоководных климатических течений;
3. выполнить валидацию результатов расчета на сетке с разрешением 1,6 км по горизонтали, с учетом реального атмосферного воздействия, путем сопоставления результатов моделирования с данными ARGO глубоководных наблюдений температуры и солёности;

4. провести анализ результатов прогностических численных экспериментов, выполненных для периодов 2006, 2010, 2011, 2013 гг. с учетом реального атмосферного воздействия на сетке с горизонтальным разрешением 1,6 км; изучить воспроизведенные особенности глубоководной циркуляции Черного моря;

5. осуществить обработку и выполнить анализ расчетных данных многолетнего ретроспективного анализа (1992–2012 г.); провести исследование среднесуточных и среднемноголетних полей глубоководных течений Черного моря;

6. провести численный эксперимент по расчету гидрофизических полей Черного моря при экстремальном атмосферном воздействии (квазитропическом циклоне в сентябре 2005 г.); проанализировать особенности и эволюцию формируемых глубоководных течений и вихрей;

7. выполнить сопоставление результатов численных экспериментов и данных натурных наблюдений, дать оценку динамическим характеристикам и пространственно-временной изменчивости глубоководных течений Черного моря.

#### **Научная новизна** диссертационной работы.

1. Впервые проведена совместная обработка и статистический анализ данных измерений глубоководных течений Черного моря из БОД МГИ, полученных в разных рейсах на научно-исследовательских судах в период 1960–2016 гг. Выполнен анализ вертикальных профилей течений, проведена оценка средних скоростей, отмечены случаи смены направлений течений с глубиной на противоположные, а также усиления средней скорости на глубоководных горизонтах.

2. Выполнена оценка скорости глубоководных течений на основе наиболее полного по сравнению с опубликованными ранее исследованиями 10-летнего массива данных наблюдений 16 буев-профилемеров ARGO. Установлено, что скорости глубоководных течений находятся в диапазоне 3–6 см/с, достигая значений 15–20 см/с, причем значительное количество рассчитанных значений скорости (20–45%) превышает 5 см/с. Показаны циклоническая направленность глубоководной циркуляции, области формирования вихревых структур разных знаков завихренности и струйных течений, распространяющихся вдоль свала глубин.

3. Рассчитаны трехмерные климатические поля температуры, солёности, скорости и уровня поверхности Черного моря с улучшенным пространственным разрешением (5 км по горизонтали) по сравнению с предыдущим (15 км) вариантом климата моря. Более детальное воспроизведение климатических полей позволило установить характерные особенности климатических течений в глубинных слоях. Впервые показана локализация и изменчивость глубоководных течений антициклонической направленности.

4. Впервые проведен численный анализ глубоководных течений Черного моря для разных временных интервалов (климатических течений на каждые сутки года; течений, воспроизведенных в прогностических расчетах на мелкой сетке 1,6 км для периодов 2006, 2010, 2011 и 2013 гг.; течений, реконструированных с помощью многолетнего реанализа гидрофизических полей (1992–2012 гг.)). Установлены особенности трехмерной структуры течений под основным пикноклином. Подтверждено наличие узких течений антициклонической направленности вдоль материкового склона Черного моря во всех расчетах.

5. Впервые для исследования особенностей глубоководных течений Черного моря проведен совместный анализ нескольких архивов данных многолетних натуральных наблюдений и результатов различных численных экспериментов. Это позволило на широкой основе, детально рассмотреть особенности глубоководных течений Черного моря и описать их пространственно-временную изменчивость.

6. Впервые показано влияние на трехмерную термохалинную и динамическую структуру вод Черного моря экстремального атмосферного (квазитропического) 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.

7. Подтверждено наличие глубоководных течений антициклонической направленности, распространяющихся под основным пикноклином вдоль северокавказского побережья, наличие которых было показано по результатам модельных расчетов. Для этого собраны, обработаны и проанализированы данные натуральных наблюдений в исследуемом районе: данные глубоководных STD-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.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Рассчитанный массив климатических гидрофизических полей Черного моря используется для изучения годового хода гидрологических параметров Черного моря и сопоставления реального состояния морской среды с ее климатическими характеристиками. Он служит основой для комплексных (физико-биологических, физико-химических и др.) исследований. Климатические поля используются также для задания начальных и/или краевых полей при проведении других численных экспериментов.

Трехмерные гидрофизические поля, воспроизведенные для периода прохождения над акваторией Черного моря атмосферного квазитропического циклона 25–29.09.2005 г., приведшего к приостановке навигации в ЮЗ части моря, восполняют недостаток информации о состоянии морской среды во время аномального атмосферного воздействия, когда контактные наблюдения отсутствовали, а спутниковые данные были малопригодны для исследования вследствие высокой облачности. В результате расчета показана трансформация термохалинной и динамической структуры вод Черного моря под экстремальным воздействием, включая образование циклонического вихря в море с мощным апвеллингом в его центре и значительное (в несколько раз) усиление течений по всей глубине в зоне аномального воздействия.

В результате комплексного рассмотрения результатов численных расчетов и обработки данных натуральных наблюдений уточнены представления о структуре глубоководных течений Черного моря. Установлено формирование узких глубоководных течений антициклонической направленности, наиболее интенсивных в весенне-летний период у северо-восточного свала глубин. Показано, что по всем наборам данных максимальные скорости глубоководных течений могут составлять до 15–20 см/с. Они достигаются в мезомасштабных вихрях и узких струйных течениях, распространяющихся вдоль материкового склона. Детализация представлений о

глубоководной циркуляции Черного моря может способствовать решению ряда практических задач, связанных с переносом веществ во всем бассейне, в том числе – задач, касающихся загрязняющего антропогенного воздействия на море.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. основные особенности и пространственно-временная изменчивость глубоководных течений Черного моря. На фоне общей циклонической циркуляции вод Черного моря под постоянным пикноклином установлено наличие квазипериодических течений антициклонической направленности;

2. количественные оценки скорости глубоководных течений, полученные на основе анализа многолетних архивов данных натурных наблюдений и результатов численного моделирования. Показано, что в мезомасштабных вихрях разных знаков завихренности и в струйных течениях, распространяющихся вдоль материкового склона, среднесуточные скорости могут достигать значений 15–20 см/с, на порядок превышая фоновые значения;

3. описание эволюции струйных течений антициклонической направленности, возникающих под основным пикноклином, наиболее часто – в северо-восточной части Черного моря в весенне-летний период. Их ширина достигает 10–12 км, протяженность – от 100 до 700 км, вертикальный размер – от двух до нескольких сотен метров. Скорости таких течений – от 3 до 8 см/с, максимальные – до 15–20 см/с, продолжительность составляет от одной до нескольких недель;

4. качественное и количественное описание трансформации трехмерных гидрофизических полей Черного моря при экстремальном атмосферном воздействии (прохождении квазитропического циклона). Возрастание скорости течений по всей глубине в зоне действия атмосферного вихря, усиление глубоководных течений до 15–20 см/с.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Все численные эксперименты, результаты которых рассматриваются в диссертации, выполнены на основе численной модели динамики Черного моря МГИ. Модель МГИ является верифицированным инструментом, способным достоверно воспроизводить циркуляцию черноморских вод. Это подтверждено результатами многочисленных численных расчетов, проведенных в ряде национальных и международных проектов.

Результаты расчетов климатических полей и ретроспективного анализа получены с усвоением в модели данных натурных измерений. Это обеспечило согласованность рассчитанных и наблюдаемых значений и реалистичность воспроизведенных полей. Результаты прогностических расчетов на сетке 1,6 км валидированы с использованием данных измерений температуры и солёности буев-профилемеров ARGO, что позволило оценить модельные поля как достоверные.

Для оценки результатов моделирования глубоководных течений были проведены расчеты климатической циркуляции (Лукьянова, 2016) по модели Института вычислительной математики (ИВМ), которые также показали наличие полученных в диссертации 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 4 численных моделей (МГИ, ИВМ-ИО, INMOM, NEMO) и данных наблюдений. Результаты расчетов выявили схожие особенности поля скорости на глубоководных горизонтах, в частности, течения антициклонической направленности у северокавказского побережья, которые подтверждаются данными измерений.

Достоверность сделанных в диссертации заключений подкрепляется всесторонним анализом предшествующих работ по предмету исследования и согласованием результатов моделирования с данными натурных наблюдений. Основные результаты диссертационной работы были апробированы на 39 научных мероприятиях – конференциях, школах, семинарах – всероссийского и международного уровня.

**Связь диссертационной работы с научными программами.** Результаты, положенные в основу диссертационной работы, были получены соискателем в качестве исполнителя по 5 темам Плана исследований Национальной академии наук Украины (2006–2015 гг.), 3 проектам Плана исследований Российской академии наук (2015–2020 гг.) и 5 проектам Российского фонда фундаментальных исследований (2010–2020 гг.).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации 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 РФ удовлетворяют 8 работ [1–8]. В их число входят 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы SCOPUS [1, 4] и Web of Science [2, 3] 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».

**Личный вклад соискателя.** Выбор тематики исследования, постановка задач и обсуждение этапов диссертационной работы осуществлялись совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. С.Г. Демышевым. Автор выражает огромную благодарность научному руководителю за помощь в проведении исследований, ценные рекомендации и всестороннюю поддержку.

Обзор литературы по теме диссертации, написание отдельных блоков программного кода, дополнительных программ для обработки и визуализации данных, подготовка и проведение расчетов гидрофизических полей Черного моря с климатическим и аномальным атмосферным воздействием, обработка и анализ расчетных данных реанализа (Дорофеев, 2016) для исследования глубоководной циркуляции выполнялись соискателем самостоятельно. Соискателем проведено обобщение результатов всех рассмотренных в диссертации численных экспериментов и выполненных по данным наблюдений оценок скорости глубоководных течений.

При непосредственном участии диссертанта выполнялись исследования рассчитанных климатических полей и данных реанализа (Лишаев, 2016), валидация результатов моделирования на сетке 1,6 км и их анализ, проводилось изучение отклика гидрофизических полей на воздействие квазитропического циклона. Соискателем совместно с коллегами из МГИ и ИО РАН выполнялись обработка и анализ данных



наблюдений из БОД МГИ, измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик», оценка скоростей течений по данным ARGO.

Соискатель выражает искреннюю признательность и благодарность за сотрудничество, содействие и поддержку всем соавторам: А.В. Багаеву, С.Г. Демышеву, С.В. Довгой, О.А. Дымовой, В.Б. Залесному, В.А. Иванову, Г.К. Коротаеву, А.Н. Лукьяновой, Н.А. Миклашевской, С.С. Нечаеву, В.Б. Пиотуху, Т.В. Пластун, Л.В. Черкесову, М.В. Шокурову. В отдельном порядке соискатель благодарит следующих авторов за предоставленную возможность использовать для исследования полученные в их работах массивы данных: В.Н. Белокопытова, С.Г. Демышева и О.А. Дымову, В.Л. Дорофеева и Л.И. Сухих, П.Н. Лишаева и В.В. Кныша, А.Г. Островского и А.Г. Зацепина, М.В. Шокурова и Д.А. Яровую. Автор выражает признательность сотрудникам МГИ Е.А. Годину, Ю.Н. Горячкину, А.В. Ингерову, Н.В. Инюшиной, А.А. Кубрякову, А.И. Мизюку, А.Н. Морозову, Л.А. Петренко, Ю.Б. Ратнеру, С.В. Станичному, И.Г. Шокуровой и сотрудникам ИО РАН Р.Д. Косьяну и К.В. Лебедеву за помощь в работе с данными и полезные консультации. Также соискатель благодарит за дискуссии и ценные советы всех сотрудников МГИ и других организаций, принимавших участие в обсуждении материалов диссертации на научных мероприятиях и в рабочем порядке.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, трех Разделов, Заключение, Списка сокращений и условных обозначений, Списка литературы из 222 наименований (из них 63 на английском языке) и Приложений. Работа включает 50 рисунков и 4 таблицы, общий объем диссертации составляет 173 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводится информация о степени разработанности и актуальности темы диссертации, целях, задачах и методах исследования, опубликованных автором работах по теме диссертации и о его личном вкладе в них. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Отмечается теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, ее научная новизна и связь с научными программами. Приводятся сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, объеме, структуре и содержании диссертации.

**Раздел 1** посвящен обработке архивных данных многолетних натурных наблюдений и оценке особенностей глубоководных течений Черного моря на их основе. Работа по обобщению и анализу накопленных к настоящему времени данных о глубоководных течениях Черного моря в представленном объеме ранее не проводилась (в подразделе 1.1 приведен обзор имеющихся публикаций). Полученные оценки используются далее в работе для сопоставления с результатами моделирования.

В подразделе 1.2 проводится анализ собранных в БОД МГИ глубоководных измерений скорости течений, полученных в период 1960–2016 гг. в ходе экспедиций на научно-исследовательских судах. Рассмотрены данные 25 глубоководных станций, из которых 18 многосуточных. Показано, что на некоторых станциях направление скорости с глубиной менялось на противоположное, установлены случаи возрастания скорости с глубиной. Медиана скорости на глубоководных горизонтах в районах наблюдений составляла от 2 до 12 см/с и превышала 5 см/с на 50 % станций

на горизонте 500 м, на 45 % станций на горизонте 750 м и на 42 % станций на глубине 1000 м. В остальных случаях медиана скорости не превышала 5 см/с. На Рисунке 1 показаны диаграммы скорости на 12-суточной станции (дискретность измерений 15 мин), выполненной в августе 1975 г. в центральной части Черного моря. За все время наблюдений направление скорости на горизонте 15 м и на горизонте 750 м было противоположным, течения на глубинах 500 и 1000 м не имели постоянного направления, а значения скорости были выше, чем вблизи поверхности.

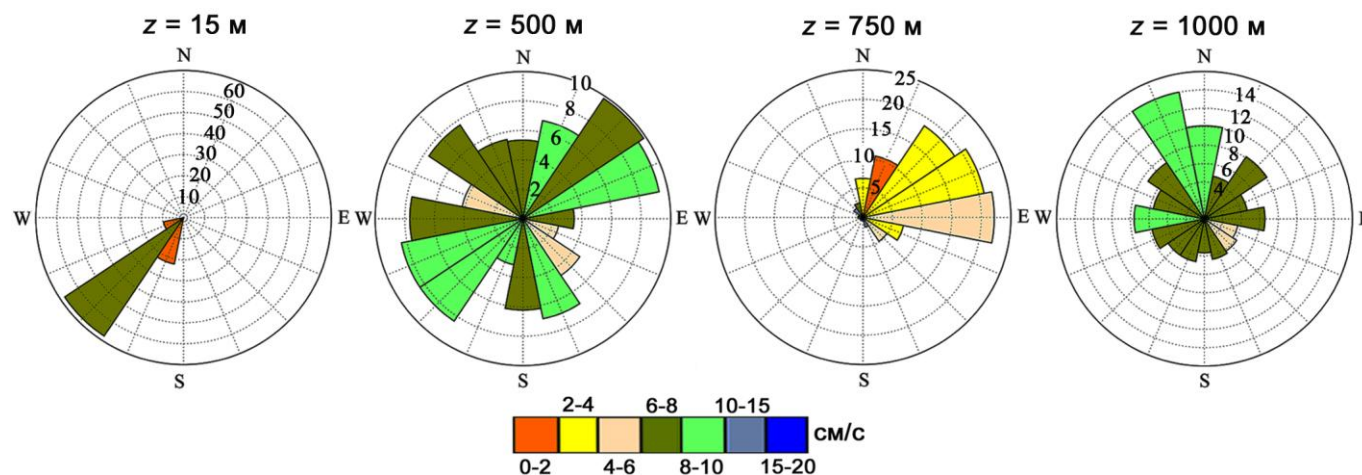


Рисунок 1 – Диаграммы скорости течений на станции (42,31 с.ш.; 34,32 в.д.) 11–22.08.1975 г. На радиальной оси отмечен процент повторяемости направления

В подразделе 1.3 скорости глубоководных течений определяются на основе другого архива данных – 10-летнего массива измерений автономных буев-профилемеров ARGO, находящегося в открытом доступе ([www.ARGOfdatamgt.org](http://www.ARGOfdatamgt.org), [www.usgoda.gov](http://www.usgoda.gov)). Аналогично работам (Korotaev, 2006; Герасимова, 2011), средняя скорость движения буев на парковочных глубинах рассчитывается на основе данных их спутникового позиционирования на поверхности моря – как отношение пройденного бую пути под водой ко времени между его погружением и последующим всплытием на поверхность. Рассмотрение данных регулярных (с периодом 5 сут.) 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. Рассчитанные по данным ARGO векторы скорости в слоях 350–600, 600–800, 800–1200 и 1200–1600 м показаны на Рисунке 2, где на изобатах (серые изолинии) отмечена глубина в метрах. Траектории буев свидетельствуют о существовании глубоководных мезомасштабных вихрей разного знака завихренности и струйных течений вдоль материкового склона. Некоторые из вихрей могут быть ассоциированы с известными особенностями поверхностной циркуляции (Батумский, Севастопольский, Кызыл-Ирмакский антициклоны, восточный и западный циклонические круговороты) или особенностями рельефа дна.

Наиболее интенсивны глубоководные течения у западной части Анатолийского побережья, где их скорость местами достигает 15–20 см/с. В абиссальной части бассейна и в районах со сложной орографией чаще встречаются вихревые структуры. Рассчитанные по данным ARGO скорости приведены в Таблице 1. Они состави-

ли около 4 см/с, усиливаясь в слое 800–1200 м до 6 см/с. Наибольшие скорости достигались в январе-марте, а самыми слабыми течения были с июня по октябрь. Примерно 88% абсолютных величин вычисленных скоростей находятся в диапазоне 1–20 см/с, значительное количество имеют величину более 5 см/с: 30 % в слое 350–600 м, 45 % в слое 800–1200 м и более 20 % – в слоях 600–800 и 1200–1600 м.

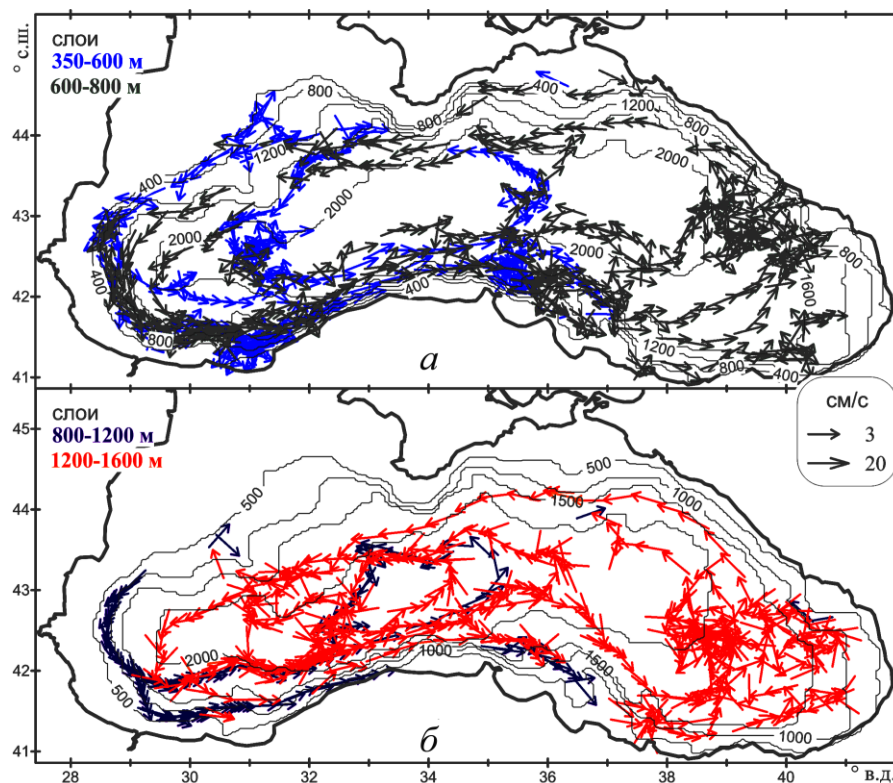


Рисунок 2 – Рассчитанные на основе данных ARGO средние скорости течений

Таблица 1 – Количество рассчитанных векторов и значения средней скорости

| Слой: глубина, м | Кол-во векторов | Средняя скорость, см/с | 95%-ный доверительный интервал, см/с |
|------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------------|
| 350 – 600        | 269             | 3,6                    | $\pm 0,4$                            |
| 600 – 800        | 496             | 4,0                    | $\pm 0,2$                            |
| 800 – 1200       | 132             | 5,7                    | $\pm 0,6$                            |
| 1200 – 1600      | 474             | 3,5                    | $\pm 0,2$                            |

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 буя ARGO № 6901833 с парковочной глубиной 200 м (Рисунок 3, а), а также по результатам обработки измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» (представленных в *подразделе 1.4*). Согласно расчетам динамическим методом, на основе данных CTD-наблюдений, скорости таких течений на полигоне в летний период составляли до 4 см/с, их ширина – до 10–12 км (Рисунок 3, б; на горизонтальной шкале показано расстояние от берега; красный цвет соответствует на-

правлению на СЗ, синий – на ЮВ). Средняя скорость перемещения буя ARGO № 6901833 в этом районе в сентябре–октябре 2016 г. составила 6,5 см/с, а в феврале 2017 г. достигала 25 см/с. Подобные течения были обнаружены на полигоне ИО РАН и при профилировании скорости зондирующим комплексом «Аквалог» в июне 2011 г. (Островский, 2013) на глубинах 500–950 м. Данные «Аквалога» сопоставляются далее (в Разделе 3) с результатами численного моделирования.

Основные результаты Раздела 1 опубликованы в статьях [2–4, 14] и в 7 тезисах и материалах конференций.

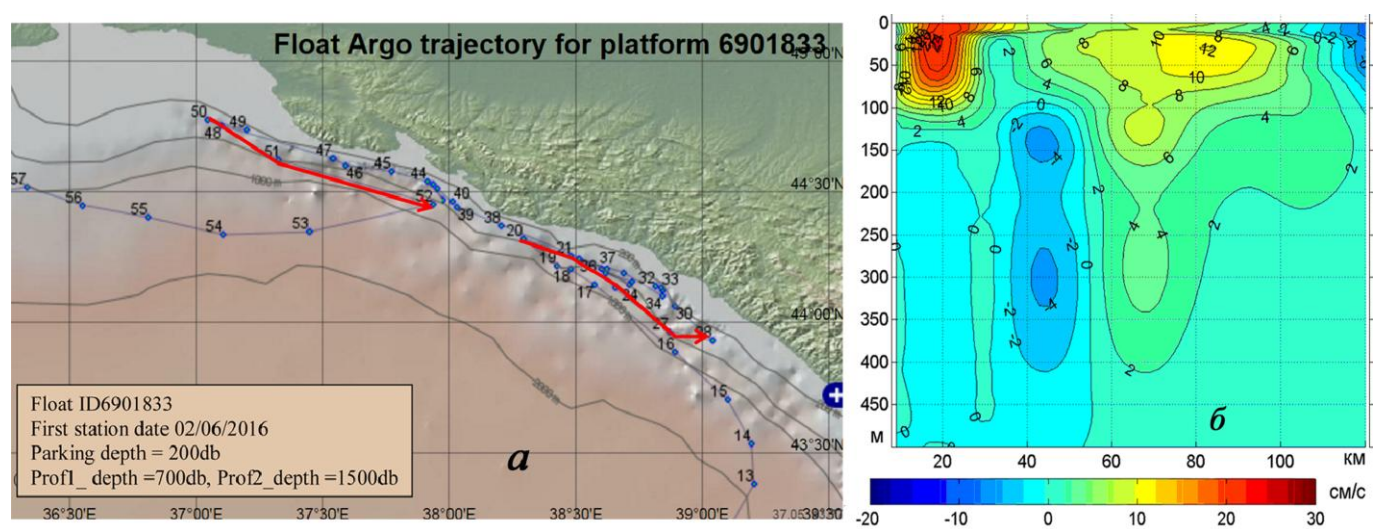


Рисунок 3 – *а* – траектория буя ARGO № 6901833 в районе северокавказского побережья, стрелками отмечены перемещения буя в ЮВ направлении 06.09–15.10.2016 г. и 03.02–13.02.2017 г.; *б* – вдольбереговая компонента скорости 02–03.07.1998 г.

**Раздел 2** посвящен изучению особенностей климатических течений Черного моря на основе результатов численного моделирования. Расчет климатических полей проводился на основе 3-мерной нелинейной  $z$ -координатной модели динамики Черного моря МГИ с периодической ассимиляцией климатических гидрологических данных о температуре и солёности (Белокопытов, 2004). Такой подход к восстановлению климата моря был реализован в модели МГИ на сетке 15 км в работах Г.К. Коротаева, С.Г. Демышева, В.В. Кныша в начале 2000-х. Современное состояние изучения климатических полей Черного моря рассматривается в подразделе 2.1.

Описание используемого варианта численной модели для расчета климата моря, начальные и граничные условия приводятся в подразделе 2.2. Модель базируется на полной системе уравнений термогидродинамики океана, записанной в  $z$ -координатах в предположениях гидростатики и Буссинеска. В нее входят уравнения движения, неразрывности, уравнения адвекции-диффузии тепла и соли и уравнение состояния. Усвоение данных климатического массива гидрологических температуры и солёности (Белокопытов, 2004) происходит через каждые 3 ч путем включения в уравнения адвекции-диффузии тепла и соли дополнительного слагаемого, зависящих от разности модельного и климатического значений соответствующего параметра. На поверхности моря задаются климатические поля ветра, потоков тепла, испарения и осадков. В устьях рек и проливах ставятся условия Дирихле для температуры, солёности и скорости, на дне – условия непротекания и отсутствия потоков



тепла и соли. На твердых боковых границах выполняются условия скольжения и непротекания, для температуры и солёности задается равенство нулю нормальных производных. В начальный момент скорости принимаются нулевыми, стратификация соответствует гидрологическому климату. В подразделе 2.3 приводятся параметры модели. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по вертикали задаются по формулам Пакановски-Филандера, коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии постоянны. Разрешение модели по горизонтали составляет 5 км, по вертикали расчет проводился на 45 горизонтах от 2,5 до 2100 м, шаг по времени 5 мин. Время достижения интегральными характеристиками квазипериодического режима составило около 1000 суток, общее время расчета – более 20 лет. Дискретность записи полей в выходных массивах данных – каждые сутки.

Анализ модельного климата Черного моря приведен в подразделе 2.4. Рассматривались поля за последний год счета. Полученные поля температуры и солёности имеют лучшее разрешение относительно усваиваемых гидрологических массивов и восполняют недостаток информации в малообеспеченных измерениями областях. Но наиболее важным результатом является построение трехмерных полей скорости для всего бассейна, получение которых только по данным наблюдений не представляется возможным. Исследована пространственно-временная изменчивость полей течений для верхнего слоя и под основным пикноклином. Показано, что в численном эксперименте воспроизводятся известные особенности бассейновой циркуляции и их сезонная эволюция. На примере Севастопольского антициклона показано, что на свале глубин происходит трансформация глубоководных вихрей с образованием более мелких вихревых структур разных знаков завихренности. Под основным пикноклином в центрах циклонических вихрей формируются области положительных аномалий температуры, а в центрах антициклонов – отрицательных, что отличает глубоководные вихри Черного моря от глубоководных вихрей океана.

Детально рассматриваются особенности глубоководных климатических течений, выявляются их основные отличия от структуры циркуляции в верхнем слое. Установлено, что в западной и восточной частях моря, где на верхних горизонтах доминируют суббассейновые циклонические круговороты, на глубинах более 300 м преобладают мезомасштабные вихри разного знака завихренности, прослеживающиеся до дна. В западной части моря нижняя часть ОЧТ определяется до глубины ~500 м, где ее интенсивность максимальна в период с января по апрель, а скорости достигают 8–10 см/с. Общая направленность глубоководной климатической циркуляции циклоническая. Показано, что в среднем абсолютные величины скоростей под основным пикноклином на порядок ниже, чем на поверхности: фоновые значения составляют до 2 см/с, и довольно высокие значения климатических скоростей (до 10–12 см/с) достигаются в мезомасштабных, преимущественно циклонических вихрях, характерных для внутренней абиссальной области моря. Эти вихри образуются в центральной и восточной глубоководных частях бассейна и со временем смещаются на запад со скоростями 1–2 см/с. Антициклонические вихри менее интенсивны и чаще отмечаются у материкового склона, а также преобладают в восточной части моря в весенне-летний период. Установлено наличие струйных течений антициклонической направленности, наиболее часто возникающих в апреле-мае у северокавказского побережья (на Рисунке 4 продублированы дополнительной

стрелкой). Они распространяются вдоль свала глубин на горизонтах от 300 м до 1800 м со скоростями от 2,5 до 4 см/с. В климатических полях такие течения имеют протяженность от нескольких десятков до нескольких сотен километров и ширину от 10 до 20 км, время их жизни составляет от одной до нескольких недель.

Основные результаты Раздела 2 опубликованы в статьях [1, 2, 9, 10, 13, 15–18] и 20 тезисах и материалах конференций.

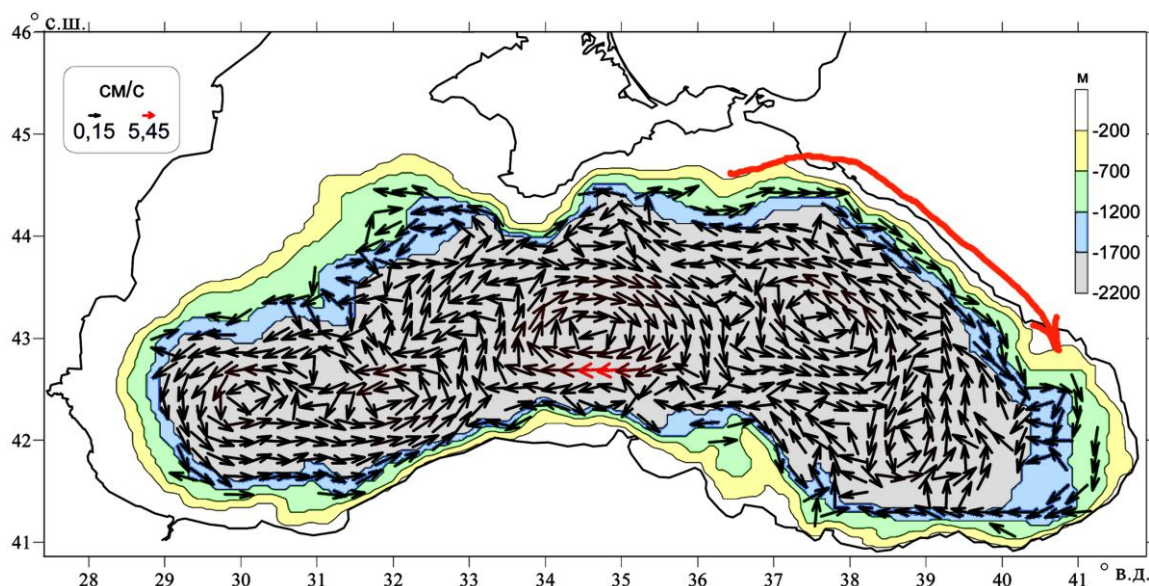


Рисунок 4 – Климатические течения на горизонте 1000 м 30 мая на фоне батиметрии

В **Разделе 3** проводится анализ глубоководной динамики Черного моря при реальных атмосферных условиях. Анализируются и сопоставляются результаты моделирования течений для различных временных интервалов – от нескольких суток (воздействие квазитропического циклона) до двух десятков лет (многолетний ретроспективный анализ). В числе анализируемых расчетных данных – как авторские, так и предоставленные другими исследователями, полученные в ходе не связанных с оценкой глубоководной циркуляции проектов.

При проведении расчетов в качестве атмосферного форсинга использовались данные атмосферных моделей ALADIN, SKIRON, ERA-Interim, MM5. В качестве начальных условий применялись рассчитанные ранее климатические поля либо результаты реанализа. В случае изменения атмосферного форсинга в численном эксперименте относительно расчета начального поля перед проведением основного расчета применялась процедура квазигеострофического приспособления. Для этого система уравнений модели интегрировалась при зафиксированных граничных условиях, соответствующих начальному моменту основного эксперимента. Время такого счета определялось согласно условию минимизации ошибки выполнения интегрального уравнения неразрывности и составляло от 2 до 4 суток. Согласованные таким образом поля использовались в качестве начальных.

В подразделе 3.1 приведены параметры модели и условия проведения прогностических экспериментов на сетке 1,6 км (Демышев, Дымова, 2015, 2018). Прогностические расчеты проводятся без усвоения в модели данных измерений. Результаты расчета для 2011 г. валидируются с помощью данных наблюдений температуры и солености ARGO (подраздел 3.2). Показано, что глубже горизонта 300 м достигается

удовлетворительное согласование модельных и измеренных значений температуры и солености, что позволяет считать модельные поля реалистичными.

В подразделе 3.3 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  $\sim 300$  м. На горизонтах 300–500 м еще обнаруживаются отдельные структуры, присущие циркуляции верхнего слоя (глубинные части западной ветви ОЧТ, наиболее крупные мезомасштабные вихри). Поле скорости на глубинах более 500 м характеризуется наличием многочисленных мезомасштабных вихрей и течений. Средние скорости течений составляют 2–5 см/с, а максимальные – до 15–20 см/с. Сезонная интенсификация скорости наблюдается зимой и осенью. В абиссальной части моря выявлены вихри, которые вблизи поверхности обнаруживаются нерегулярно, тогда как начиная с глубины 150–300 м их структура прослеживается отчетливо, а значения скорости в них могут достигать 15–20 см/с. Вихри центральной части моря сохраняют свою структуру до дна, на свале глубин особенности рельефа могут приводить к деформации глубоководных вихрей и к преобразованию их в вихри более мелких масштабов.

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. Такие течения могут формироваться во все сезоны, но чаще в весенне-летний период, продолжительность существования – от одной до нескольких недель. Для отдельных дат они показаны на Рисунке 5, где продублированы дополнительными красными стрелками. На рисунке отметим также наличие мезомасштабных глубоководных вихрей разного знака завихренности и соответствующих аномалий в полях солености.

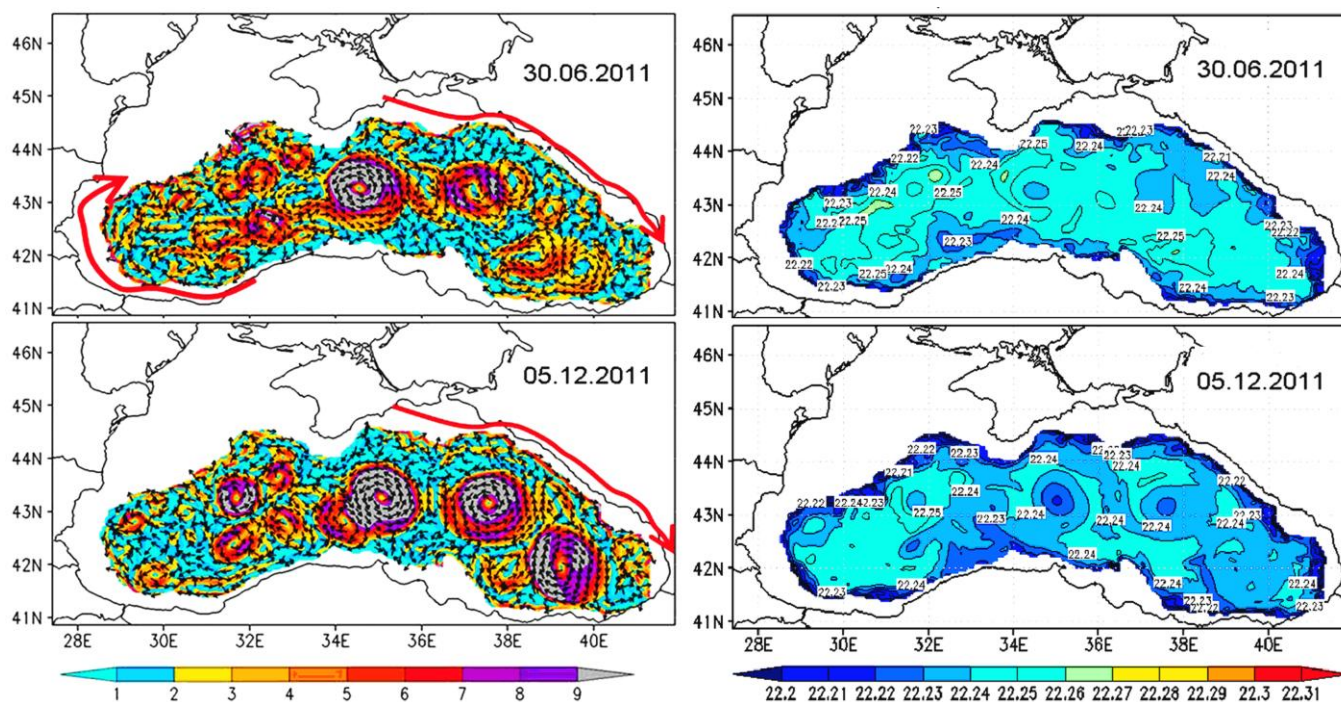


Рисунок 5 – Поля скорости, см/с (слева) и солености, ‰ (справа) на горизонте 1100 м по результатам прогностического расчета на 2011 г.



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, солёности и уровне моря, выполнено исследование среднесуточных и среднемноголетних скоростей течений. Показано, что среднесуточные скорости на глубинах более 500 м довольно низкие (до 2 см/с), а общее направление циркуляции циклоническое. На этом фоне присутствуют мезомасштабные динамические структуры со скоростями в несколько раз выше (максимально до 20 см/с). Это циклонические вихри, которые в среднемноголетних полях четко прослеживаются на горизонтах 500 м и глубже, наиболее часто они формируются в центре восточной половины моря и смещаются на запад со скоростями 1–2 см/с. Антициклонические глубоководные вихри образуются преимущественно по периферии бассейна и значительно уступают циклоническим в размерах и интенсивности. Они характеризуются низкими скоростями (до 3–5 см/с), наиболее часто формируются весной и диссипируют в конце лета.

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. Основные характеристики атмосферного вихря соответствовали параметрам тропических циклонов, результаты его моделирования (Ефимов, 2007) использованы в качестве атмосферного воздействия в модели МГИ при расчете динамики моря. По итогам расчета показаны формирующиеся особенности гидрофизических полей, согласующиеся с данными спутниковых наблюдений температуры поверхности моря – SST (Рисунок 6).

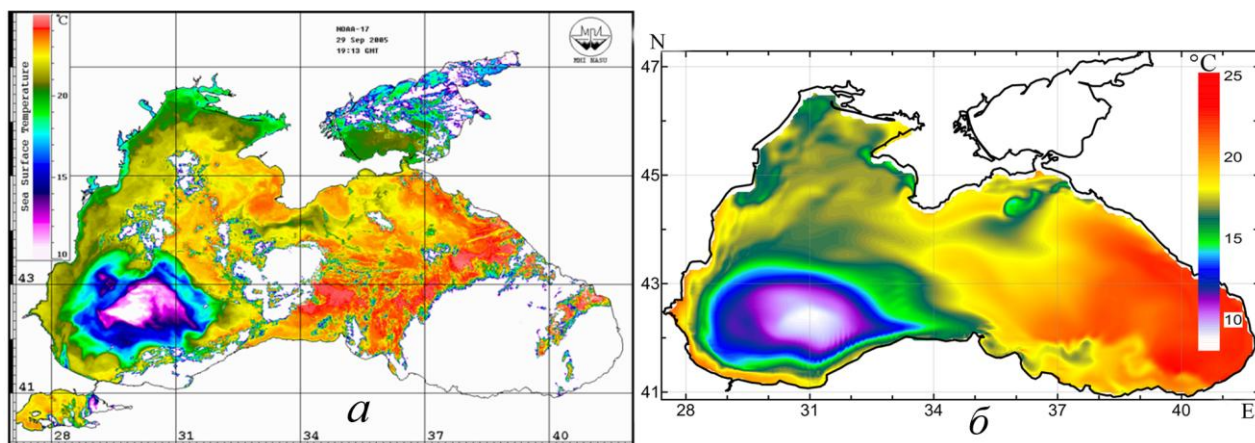


Рисунок 6 – Температура поверхности моря 29.09.2005 г.: *а* – SST по данным наблюдений со спутника NOAA-17, *б* – по результатам моделирования (горизонт 5 м)

К установленным особенностям гидрофизических полей в этот период относятся возникновение в ЮЗ части моря интенсивного циклонического вихря с мощ-



ным апвеллингом в его центре, приведшим к выходу на поверхность вод с температурой ниже  $10^{\circ}\text{C}$ , и значительное усиление течений вдоль границ бассейна. 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 (Рисунок 7).

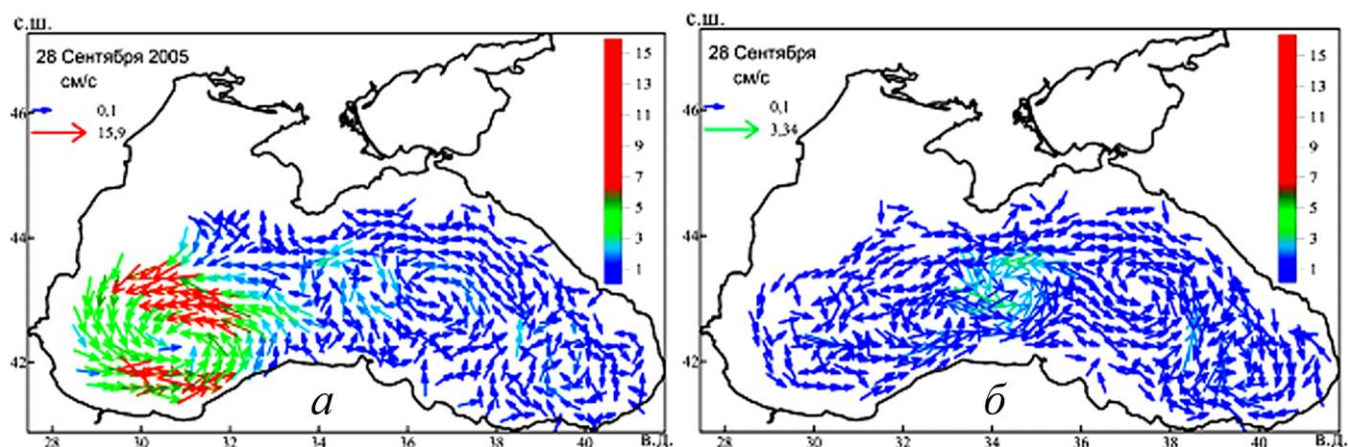


Рисунок 7 – Течения на горизонте 1000 м: *а* – среднесуточные 28.09.2005 г. (при воздействии квазитропического циклона), *б* – климатические

В подразделе 3.6 особенности глубоководных течений Черного моря, определенные по результатам численных экспериментов, сопоставляются между собой (Рисунок 8), а также с оценками скорости течений на основе данных наблюдений.

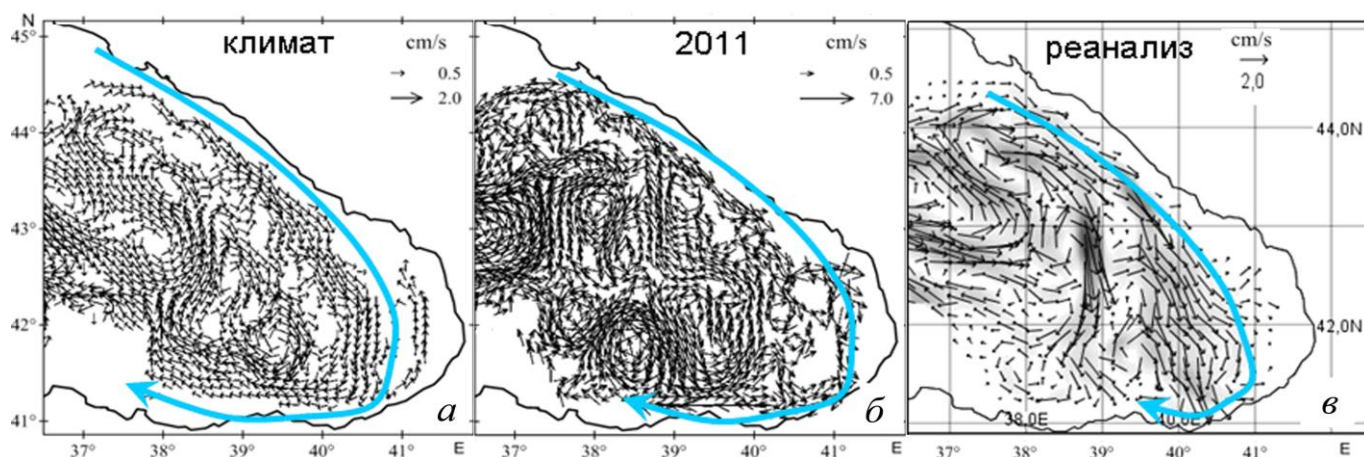


Рисунок 8 – Течения в восточной части Черного моря (горизонт 1100 м, 11 апреля) по данным расчетов: *а* – климата, *б* – прогностического на 2011 г., *в* – реанализа (Дорофеев, 2016)

Сопоставление результатов экспериментов позволило выявить общие особенности и пространственно-временную изменчивость поля течений. 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 наблю-

дений температуры и солёности 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 солёности в основном пикноклине. В результате обработки данных реанализа для периода 1993–2002 гг. установлено наличие течений антициклонической направленности вдоль северокавказского побережья в апреле–июле 1993, 1998, 1999, 2001 гг. уже с горизонтов 250–350 м. Их скорости составляли 1,5–4 см/с, а ширина – 30–35 км.

По итогам сопоставления результатов моделирования и натурных данных установлено, что максимальные скорости (до 15–20 см/с) на глубоководных горизонтах достигаются в мезомасштабных вихрях и струйных течениях вдоль материкового склона. При этом фоновые значения скорости довольно низкие (до 1–2 см/с). Присутствие вихрей разного знака завихренности определяется как по результатам численных расчетов, так и по данным ARGO и косвенно подтверждается данными глубоководных измерений течений из БОД МГИ.

Величины средних скоростей течений по результатам расчетов с реальным атмосферным воздействием в целом соответствуют оценкам скорости по данным буев ARGO. Средние скорости по всем рассмотренным наборам данных составили: на горизонте 500 м – от 3,5 до 4,5 см/с, на глубине 750 м – от 2,5 до 4,0 см/с на горизонте 1000 м – от 3 до 6 см/с и на 1500 м – от 3,0 до 3,5 см/с.

Проведено сравнение результатов моделирования для 2011 г. на сетке 1,6 км с данными вертикального профилирования скорости течений зондирующим комплексом «Аквалог» 17–19.06.2011 г. (Островский, 2013), когда на глубинах 500–950 м в районе Геленджика было зафиксировано юго-восточное (антициклонической направленности) течение, ядро которого со скоростями около 3 см/с залегало в слое 700–850 м. Рисунок 9 демонстрирует, что в период, охватывающий даты зондирования, в ближайшем к точке наблюдений узле расчетной сетки модели также выявлено наличие подобного течения ( $U > 0$ ,  $V < 0$  – под горизонтальной пунктирной линией).

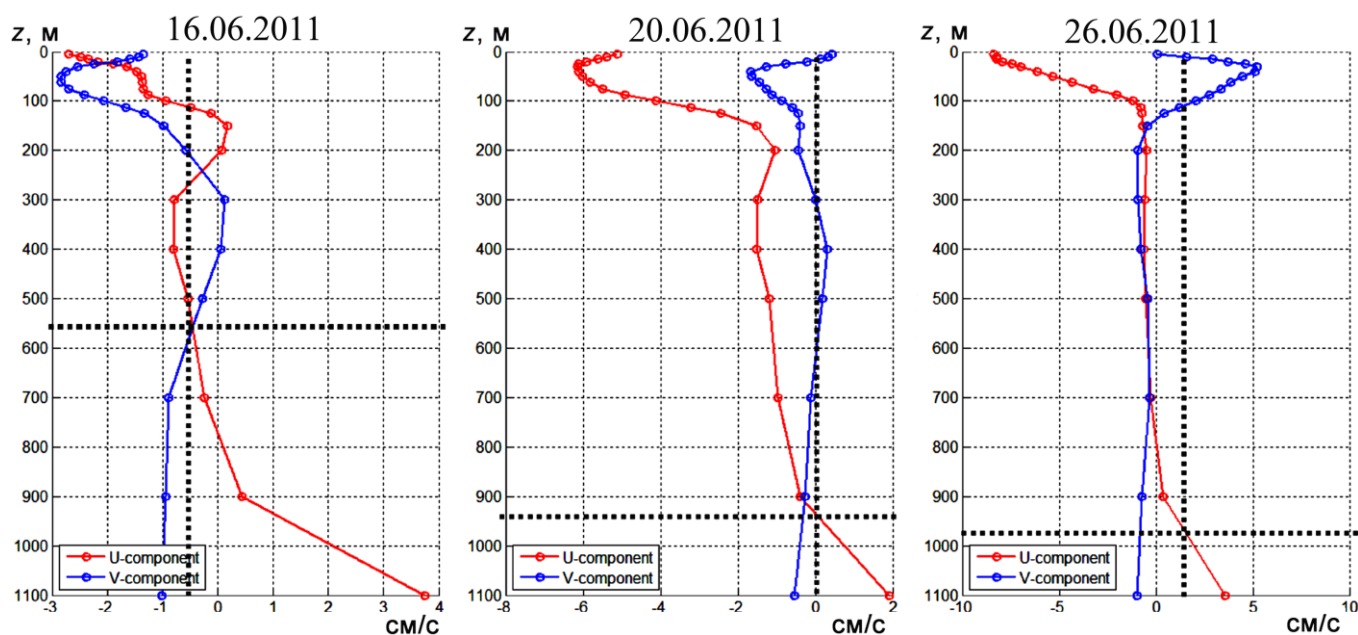


Рисунок 9 – Профили составляющих скорости в точке (37,86 в.д., 44,39 с.ш.) по результатам моделирования

Таким образом, квазипериодическое формирование глубоководных течений антициклонической направленности, распространяющихся вдоль континентального склона под основным пикноклином, было обнаружено в результатах всех численных экспериментов и согласуется с имеющимися данными наблюдений. Выводы о наличии подобных течений наличия соответствуют также результатам расчетов на основе других современных численных моделей (Архипкин, 2013; Лукьянова, 2016; Коршенко, 2019; Сендеров, 2019).

Также в подразделе обсуждается соответствие характеристик установленных в диссертационной работе особенностей глубоководных течений имеющимся в научной литературе гипотезам их формирования. В частности, в работе показано, что известный эффект сезонной интенсификации и увеличения циклонической завихренности ветра над Черным морем приводит к общему усилению течений и заглублению нижней границы ОЧТ до горизонтов 700–1200 м вдоль западного побережья. Согласно работе (Каменкович, 1982), одной из причин трансформации глубоководных течений может служить импульсное ветровое воздействие, этот эффект продемонстрирован в работе на примере воздействия на Черное море квазитропического циклона. Перемещение вблизи свала глубин мезомасштабных антициклонических вихрей, отмечающееся в результатах численных расчетов, – одна из причин формирования узких локальных противотечений согласно наблюдениям в других районах Мирового океана (Francis, 2020). Вместе с тем, нужно отметить, что образование антициклонических вихрей происходит преимущественно вследствие сезонного, весенне-летнего ослабления и меандрирования ОЧТ, связанного, в свою очередь, с завихренностью поля ветра над морем. Важную роль в глубоководных процессах играют также особенности стратификации и рельефа дна. Поэтому говорить о какой-либо одной конкретной причине формирования течений антициклонической направленности в глубинных слоях пока затруднительно. В сложной системе взаимодействия атмосферы и моря для выяснения предпосылок их появления и определения доминирующего вынуждающего фактора требуется значительно больший массив данных натурных наблюдений и проведение дальнейших исследований.

Основные результаты Раздела 3 опубликованы в статьях [2, 5–8, 11, 12] и 20 тезисах и материалах конференций.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен совместный анализ массивов данных глубоководных натурных наблюдений: измерений скоростей течений из БОД МГИ, выполненных в период 1960–2016 гг., данных автономных профилирующих буев ARGO за 2005–2015 гг., STD–измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» в 1997–2008 гг. и результатов измерений течений зондирующим комплексом «Аквалог» в июне 2011 г. Это позволило выявить особенности поля течений Черного моря: установлены факты смены направления и увеличения скорости течений с глубиной, показано наличие мезомасштабных глубоководных вихрей разных знаков завихренности и струйных течений, распространяющихся вдоль материкового склона.

2. На основе данных измерений скоростей течений из БОД МГИ определены статистические характеристики течений на горизонтах 500, 750 и 1000 м. Медиана скорости на глубоководных горизонтах в районах наблюдений составляла от 2 до 12 см/с и превышала 5 см/с на 50 % станций на горизонте 500 м, на 45 % станций на горизонте 750 м и на 42 % станций на глубине 1000 м.

3. Проведена обработка данных 10-летнего массива регулярных измерений буев-профилемеров ARGO. Расчет и анализ скорости перемещения буев в окрестностях их парковочных глубин показал сезонную изменчивость скорости течений на горизонтах 350–1600 м. Наибольшие скорости отмечены в январе–марте, самые низкие – в июне–октябре. Средние скорости глубоководных течений по данным ARGO составили 3–4 см/с, а в слое 800–1200 м – 6 см/с. Значительное количество рассчитанных по данным буев векторов скорости имело величину более 5 см/с: 30 % в слое 350–600 м, 45 % в слое 800–1200 м и более 20 % – в слоях 600–800 и 1200–1600 м.

4. Показано, что направление движения буев ARGO соответствует циклоническому характеру циркуляции в бассейне. На глубоководных горизонтах определено наличие мезомасштабных вихрей разных знаков завихренности. Некоторые из них можно соотнести с известными вихрями верхнего слоя моря или особенностями рельефа дна. Показано, что глубоководные течения распространяются вдоль материкового склона, наиболее интенсивны они у западной части Анатолийского побережья, где их скорости местами достигают 15–20 см/с. В глубоководной части бассейна и в районах со сложным рельефом дна чаще встречаются вихревые структуры.

5. Выполнено моделирование климатических полей Черного моря на основе модели МГИ с разрешением 5 км по горизонтали с ассимиляцией среднемноголетних данных о температуре и солености. Построены согласованные с данными наблюдений трехмерные поля течений Черного моря на каждые сутки года. На основе анализа рассчитанных полей установлены основные особенности глубоководной климатической циркуляции. К ним относятся отсутствие единого круговорота ОЧТ на горизонтах более 300 м и преобладание мезомасштабных динамических образований – вихрей и течений, распространяющихся вдоль континентального склона. Показано, что в среднем величины скоростей под основным пикноклином на порядок ниже, чем на поверхности: фоновые значения климатических скоростей менее 2 см/с, и довольно высокие значения (до 10–12 см/с) достигаются в мезомасштабных, преимущественно циклонических вихрях, характерных для внутренней абиссальной области моря. На примере Севастопольского антициклона показано, что на свале глубин возможна трансформация глубоководных вихрей и образование более мелких вихревых структур разных знаков завихренности. Под основным пикноклином в центрах циклонических вихрей формируются области положительных аномалий температуры, а в центрах антициклонов – отрицательных, что отличает глубоководные вихри Черного моря от глубоководных вихрей океана. Общий характер глубоководной циркуляции по данным расчета климата моря – циклонический. При расчете климатических полей впервые было показано наличие квазипериодических течений антициклонической направленности вдоль континентального склона, наиболее часто возникающих в весенне-летний период у северокавказского побережья.

6. Анализ результатов численных экспериментов с учетом реального атмосферного воздействия для конкретных периодов – прогностических расчетов на сет-

ке 1,6 км и многолетнего реанализа гидрофизических полей – позволил уточнить представления о структуре глубоководных течений, полученные в результате расчета климата моря. Из анализа среднесуточных и среднемноголетних полей течений следует, что ОЧТ как единый циклонический круговорот бассейнового масштаба на глубинах более 300 м отсутствует, однако его западная ветвь зимой может достигать горизонта 1200 м в виде узкого течения вдоль материкового склона. Во всех расчетах на глубинах более 300–500 м при фоновых скоростях до 1–2 см/с установлено наличие мезомасштабных вихрей и струйных течений со средними значениями скорости 5–8 см/с и максимальными – до 15–20 см/с. Мезомасштабные вихри центральной абиссальной части моря прослеживаются до дна без существенного изменения их структуры, в то время как на свале глубин особенности рельефа дна могут приводить к трансформации вихревых структур и течений.

7. Показано на примере квазитропического циклона 25–29.09.2005 г., что экстремальное атмосферное воздействие на Черное море может приводить к существенной трансформации поля скорости и значительному (в несколько раз) усилению глубоководных течений – до 15–20 см/с. Установлено, что реакцией морской среды на резкую интенсификацию ветра стало формирование циклонического вихря в море с мощным апвеллингом в центре, приведшим к выходу на поверхность вод с температурой ниже 10°C, усилению струйного течения вдоль границ бассейна и возрастанию скоростей по всей глубине в зоне экстремального воздействия. Результаты численного моделирования для периода прохождения квазитропического циклона согласуются с данными SST спутникового зондирования поверхности моря.

8. По итогам обобщения результатов численных экспериментов и данных натурных наблюдений установлены следующие особенности глубоководных течений Черного моря. Единый циклонический круговорот ОЧТ на глубинах более 300 м отсутствует, однако его наиболее интенсивная западная ветвь обнаруживается до горизонтов 700–1200 м в разные годы. Фоновые скорости под постоянным пикноклином составляют до 1–2 см/с, однако в мезомасштабных вихрях и течениях могут достигаться значения до 15–20 см/с. Зимой происходит общая интенсификация течений. На глубинах более 300–500 м мезомасштабные циклонические вихри центральной абиссальной части моря – наиболее мощные динамические структуры, характерные для всех сезонов. Антициклонические вихри менее интенсивны и чаще отмечаются вдоль материкового склона, а также преобладают в восточной части моря в весенне-летний период. Во всех данных численных расчетов и натурных наблюдений обнаружены квазипериодические узкие течения, распространяющиеся в антициклоническом направлении вдоль отдельных участков материкового склона.

9. Глубоководные течения антициклонической направленности, распространяющиеся вдоль континентального склона, были выявлены по результатам всех численных экспериментов (климатического, прогностических, реанализа). Они обнаруживаются в слое от нижней границы постоянного пикноклина (250–300 м) до глубины 1700–1800 м. Ширина течений достигает 10–12 км, протяженность – от 100 до 700 км, вертикальный размер – от двух до нескольких сотен метров. Их скорости составляют от 3 до 8 см/с, максимальные – до 15–20 см/с, продолжительность – от одной до нескольких недель. У северокавказского побережья наличие течений анти-



циклонической направленности согласуется с данными натурных наблюдений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» и данными буя ARGO № 6901833.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Demyshev S.G., Ivanov V.A., **Markova N.V.** 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 // *Physical Oceanography*. – 2009. – Vol. 19, Iss. 1. – P. 1–12. – DOI: 10.1007/s11110-009-9034-x
2. Demyshev S.G., Dymova O.A., **Markova N.V.**, Piotukh V.B. Numerical experiments on modeling of the Black Sea deep currents // *Physical Oceanography*. – 2016. – № 2. – P. 38–50. – DOI: 10.22449/1573-160X-2016-2-34-45
3. **Markova N.V.**, Bagaev A.V. The Black Sea deep current velocities estimated from the data of Argo profiling floats // *Physical Oceanography*. – 2016. – № 3. – P. 23–35. – DOI: 10.22449/1573-160X-2016-3-23-35
4. Ivanov V.A., Plastun T.V., **Markova N.V.**, Bagaev A.V. Statistical parameters of the Black Sea deep currents based on measurement data // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. – 2019. – Vol. 12, Iss. 4. – P. 49–58. – DOI: 10.7868/S2073667319040063
5. Дымова О.А., Миклашевская Н.А., **Маркова Н.В.** Особенности глубоководной циркуляции Черного моря летом 2013 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2019. – Вып. 1. – С. 40–47.
6. **Маркова Н.В.**, Дымова О.А. Валидация результатов численного моделирования гидрофизических полей Черного моря под основным пикноклином с использованием данных ARGO // *Процессы в геосредах*. – 2019. – № 1(19). – С. 45–50.
7. Демышев С.Г., **Маркова Н.В.**, Коротаев Г.К. Моделирование циркуляции в Черном море в сентябре 2005 г. при различных параметризациях турбулентной диффузии и вязкости по вертикали // *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., Дымова О.А., **Маркова Н.В.**, Демышев С.Г., Черкесов Л.В. Оценка состояния морской среды при экстремальных штормовых условиях в некоторых районах нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений у черноморского побережья Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – Вып. 28. – С. 276–286.
9. Демышев С.Г., **Маркова Н.В.** Региональные особенности климатического поля течений на северо-западном шельфе Черного моря // *Доповіді Національної Академії наук України*. – 2006. – №4. – С. 104–107.
10. Демышев С.Г., Иванов В.А., **Маркова Н.В.**, Черкесов Л.В. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С. 215–226.

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

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

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

14. Лукьянова А.Н., Багаев А.В., Пластун Т.В., **Маркова Н.В.**, Залесный В.Б., Иванов В.А. 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 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ, 2016. – Вып. 3. – С. 9–14.

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

#### Статьи в рецензируемых сборниках научных трудов

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

17. **Маркова Н.В.**, Дымова О.А. Термохалинные и динамические особенности климатических полей Черного моря в районе северо-кавказского побережья: анализ результатов моделирования и сравнение с данными наблюдений // 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.**, Дымова О.А. О течениях в зоне континентального склона Черного моря: результаты численных экспериментов // 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.

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Марковой Натальи Владимировны

Подписано к печати 25.11.2020 г.  
Объем 0,9 п.л.

Заказ № 356

Формат бумаги 60×84 1/16  
Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии «КУПОЛ»  
299053

г. Севастополь, ул. Муссонная, 46  
Тел.: +7 978 784 66 32  
[kupol.sevastopol@mail.ru](mailto:kupol.sevastopol@mail.ru)