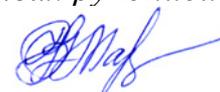


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН»

На правах рукописи



МАРКОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

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

специальность 25.00.28 – океанология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
Демышев Сергей Германович

Севастополь – 2020

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	23
1.1 Обзор литературных источников	23
1.2 Анализ данных измерений глубоководных течений Черного моря из Банка океанографических данных МГИ	27
1.3 Оценка скоростей глубоководных течений Черного моря по данным автономных буев–профилемеров ARGO	34
1.3.1 Использование данных ARGO для расчета скоростей течений	34
1.3.2 Расчет скоростей глубоководных течений	36
1.3.3 Анализ результатов расчета скоростей	38
1.3.4 Погрешности метода	42
1.3.5 Течения антициклонической направленности по данным буя ARGO № 6901833	44
1.4 Скорости глубоководных течений по данным измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик»	46
1.4.1 Используемые данные наблюдений на полигоне	46
1.4.2 Расчет скоростей течений на основе STD–данных	46
1.4.3 Данные зондирующего комплекса «Аквалог»	49
Выводы к Разделу 1	51
РАЗДЕЛ 2. ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ	54
2.1 Об исследованиях климатических течений Черного моря	54
2.2 Описание численной модели. Граничные и начальные условия	57
2.3 Параметры расчета климатических полей	62
2.4 Анализ модельного климата Черного моря	64
2.4.1 Воспроизведение моделью известных особенностей термохалинной и динамической структур вод Черного моря в верхнем слое	64

2.4.2 Особенности глубоководных климатических течений Черного моря...	70
2.4.3 Глубоководные течения антициклонической направленности	77
Выводы к Разделу 2	79
РАЗДЕЛ 3. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С РЕАЛЬНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	81
3.1 Условия проведения численных экспериментов и параметры модели	81
3.2 Валидация результатов моделирования с использованием данных ARGO наблюдений температуры и солености	85
3.3 Анализ глубоководных течений Черного моря по результатам прогностических расчетов	88
3.4 Особенности глубоководных течений Черного моря по данным многолетнего ретроспективного анализа	95
3.4.1 Используемые расчетные данные	95
3.4.2 Анализ среднесуточных и среднемноголетних полей течений	96
3.5 Влияние экстремального атмосферного воздействия на глубоководную циркуляцию Черного моря (на примере квазитропического циклона)	100
3.5.1 Квазитропический циклон в атмосфере над Черным морем	100
3.5.2 Параметры модели	102
3.5.3 Результаты расчета гидрофизических полей	103
3.5.4 Влияние квазитропического циклона на глубоководные течения	106
3.6 Сопоставление особенностей глубоководных течений Черного моря по результатам численного моделирования и данным натурных наблюдений	108
3.6.1 Сопоставление результатов численных экспериментов	108
3.6.2 Уточнение верхней границы течений антициклонической направленности	111
3.6.3 Сопоставление результатов расчетов с данными зондирующего комплекса «Аквалог»	114
3.6.4 Сопоставление результатов численного моделирования с данными многолетних натурных наблюдений	117

3.6.5 Свидетельства наличия глубоководных течений антициклонической направленности в результатах расчетов на основе других численных моделей	119
3.6.6 О гипотезах формирования глубоководных течений Черного моря ..	121
Выводы к Разделу 3	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
ПРИЛОЖЕНИЯ	161
Приложение А Информация о глубоководных станциях наблюдения течений ..	161
Приложение Б Дополнительный иллюстративный материал к результатам численного моделирования	166

Актуальность и степень разработанности темы. Структура и изменчивость гидрофизических полей Черного моря исследуются в последние годы довольно интенсивно. Для этого и по отдельности, и в комплексе используются различные методы изучения морской среды. Исследования ведутся на основе контактных измерений [1, 131, 133, 138, 180, 199], данных дистанционного зондирования морской поверхности [73, 157, 189, 217], численного и лабораторного моделирования [2, 47, 55, 56, 69, 83, 94, 172]. С использованием результатов натурных и численных экспериментов проводится анализ текущего, предшествующего и прогнозируемого состояний морской среды, однако преобладающая часть всех работ фокусируется на процессах, происходящих в верхнем слое моря (от поверхности до глубин 200–300 м). Количество публикаций, в которых приводятся результаты исследований глубоководной (на горизонтах более 300 м) динамики Черного моря, по-прежнему мало, и структура течений под основным (постоянным) пикноклином изучена слабо. Ключевая причина такой ситуации – дефицит данных и сложность натурных наблюдений на глубинах более 300 м.

До начала интенсивной экспедиционной деятельности в конце 1980-х гг. и получения новых данных измерений, глубоководная циркуляция полагалась крайне слабой и не обладающей какой-либо изменчивостью. По результатам проведенных экспедиций было выполнено описание некоторых обнаруженных глубоководных динамических структур [23, 64, 132, 201, 202, 205, 206] и установлено наличие межгодовой изменчивости поля скорости под основным пикноклином. В первой для Черного моря работе по расчету скорости течений на основе данных автономных буюв-профилемеров [185] 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 отсутствия под ОЧТ предполагавшегося антициклонического течения бассейнового масштаба (противотечения) послужили траектории 3 буев-профилемеров, продолжительное время дрейфовавших в циклоническом направлении на глубинах 200, 750 и 1550 м [185]. Сейчас количество регулярных данных таких буев, организованных в систему ARGO, значительно увеличилось, что позволило в диссертационной работе исследовать этот вопрос более детально.

Вместе с тем, о присутствии в глубинных слоях Черного моря течений антициклонической направленности говорится в ряде работ, выполненных на основе других данных наблюдений [12, 14–16, 19, 138, 203]. При этом, учитывая ограниченность по времени и/или пространству анализируемых массивов измерений, масштабы фиксируемых процессов не вполне очевидны. Наличие элементов глубоководной антициклонической циркуляции может быть объяснено в таких случаях не только наличием противотечения бассейнового масштаба, но 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 оперативном режиме. В опубликованных описаниях результатов численного моделирования также встречаются упоминания о течениях, направленных противоположно вышележащему ОЧТ [2, 50, 65, 85, 102, 140, 173]. 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 ре-

зультатов численного моделирования, требующего сопоставления с максимально возможным числом накопленных данных 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. Численный анализ динамики вод Черного моря с помощью современных численных моделей, установление качественных и количественных особенностей глубоководных течений, учет максимального количества имеющихся данных натурных наблюдений способны не только помочь найти ответы на отдельные исследовательские вопросы, но и внести вклад в представления о структуре и изменчивости трехмерной циркуляции 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 [47, 48] (далее – модель МГИ).

Исследование особенностей глубоководных течений проводится посредством анализа результатов модельных расчетов (численных экспериментов), выполненных как для климатических, так и для реальных¹, 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 были поставлены и решены следующие *задачи*:

¹ Под реальным атмосферным воздействием (форсингом) будем понимать атмосферные поля, воспроизведенные специализированными численными моделями [165, 177, 204, 211] для конкретных временных интервалов

1. обработать и выполнить анализ данных архивов многолетних натуральных наблюдений: измерений скорости течений из Банка океанографических данных МГИ, данных судовых CTD–измерений на Черноморском полигоне 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 среднемноголетних данных наблюдений температуры и солености, исследовать 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 солености;

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 натуральных 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 Банка океанографических данных МГИ, полученных в разных рейсах на научно-исследовательских су-

дах (НИС) 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, солености, 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 сентября 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 натурных 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 может служить основой для комплексных (физико-биологических, физико-химических и т.п.) исследований. Климатические поля используются также для задания начальных и/или краевых полей при проведении других численных экспериментов. При моделировании физических и экологических процессов в бассейне Черного моря рассчитанный климатический массив уже применялся, например, в работах [35, 40, 52, 91].

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 расчета была показана трансформация термохалинной и динамической структур вод Черного моря под экстремальным ветровым воздействием, установлено, что влияние атмосферного циклона приводит не только к образованию циклонического круговорота в море с мощным подъемом холодных вод в его центре, но и к значительному (в несколько раз) усилению течений по всей глубине в зоне действия вихря.

В результате комплексного рассмотрения результатов численных экспериментов и обработки данных натурных наблюдений были 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 мезомасштабных¹ 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 касающихся антропогенного загрязняющего воздействия на море.

Положения, выносимые на защиту:

¹ Масштабы движения определяются относительно значения первого бароклинного радиуса деформации Россби R_d [219]. Радиус мезомасштабных вихрей больше R_d . Для глубоководной части Черного моря R_d составляет около 20 км [10, 24]

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 натуральных 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. Численная модель МГИ является верифицированным инструментом, способным достоверно воспроизводить циркуляцию черноморских вод. Это подтверждено результатами многочисленных численных расчетов, проведенных в ряде национальных и международных проектов [86, 91, 170, 186, 188].

Результаты расчетов климатических полей и ретроспективного анализа получены с усвоением в численной модели данных натуральных измерений. Это обес-

печило реалистичность воспроизведенных гидрофизических полей. Результаты прогностических расчетов на сетке 1,6 км были 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 по модели Института вычислительной математики (ИВМ), которые также показали наличие полученных в диссертации глубоководных течений антициклонической направленности [102].

В рамках проекта РФФИ 18-05-00353_A «Исследование глубоководной циркуляции Черного моря на основе результатов мультимодельных численных экспериментов и данных натуральных 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 по указанным моделям подтвердили наличие схожих особенностей поля скорости на глубоководных горизонтах, в частности, течений антициклонической направленности у северокавказского побережья, которые подтверждаются данными измерений.

Достоверность сделанных в диссертации заключений подкрепляется также всесторонним анализом предшествующих работ по предмету исследования и согласованием результатов моделирования с данными натуральных наблюдений.

Основные результаты диссертационной работы были апробированы на следующих научных мероприятиях, проводившихся в России и за рубежом:

1. Научной конференции «Ломоносовские чтения» (Севастополь, филиал МГУ в г. Севастополе, 4–5 мая 2005 г.);
2. IV Всеукраинской конференции для молодых ученых «Понт Эвксинский – 2005» (Севастополь, ИнБЮМ НАНУ, 24–27 мая 2005 г.);
3. Международной научной конференции «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей» (Крым, Донузлав, 13–16 сентября 2005 г.);
4. Международном научно-техническом семинаре «Системы контроля окружающей среды – 2005» (Севастополь, МГИ НАНУ, 19–23 сентября 2005 г.);

5. Международной научной школе–конференции «Рациональное природопользование» (Москва, МГУ, 7–9 декабря 2005 г.);
6. Международной конференции «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке» (Севастополь, МГИ НАНУ, 19–24 августа 2006 г.);
7. Научной конференции «Ломоносовские чтения – 2007» (Севастополь, филиал МГУ в г. Севастополе, 3–4 мая 2007 г.);
8. Международной конференции молодых ученых «Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины» (Севастополь–Кацивели, МГИ НАНУ, 12–14 июня 2007 г.);
9. V Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский государственный университет, 24–25 апреля 2008 г.);
10. The Second BeNCoRe Conference «Geographic Information Systems in Coastal and Marine Research and Management» (Belgium, Leuven, May, 30, 2008);
11. Международной конференции (школе–семинаре) «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей» (г. Балтийск, Калининградская область, 30 июня – 4 июля 2008 г.);
12. Workshop on High Resolution Climate Modeling (Italy, Trieste, ICTP, 10–14 August, 2009);
13. VI Международной научно–практической конференции молодых ученых «Понт Эвксинский – 2009» (Севастополь, ИнБЮМ НАНУ, 21–24 сентября 2009 г.);
14. Научной конференции «Ломоносовские чтения – 2010» (Севастополь, филиал МГУ в г. Севастополе, 21–23 апреля 2010 г.);
15. VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский государственный университет, 11–14 мая 2010 г.);

16. Украинско–российском семинаре «Южные моря как имитационная модель океана» (Севастополь, МГИ НАН Украины, 17–21 сентября 2012 г.);

17. International Workshop on «Extreme Weather and Climate Events in the Southern Caucasus – Black Sea Region» (Georgia, Tbilisi, 3 June 2013 – 7 June 2013);

18. Международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (Севастополь – Кацивели, 15–18 сентября 2014 г.);

19. Научно–практической конференции «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (Севастополь, ФГБУН МГИ, 16–18 сентября 2015 г.);

20. IX Всероссийской научно–практической конференции молодых ученых (с международным участием) по проблемам водных экосистем «Понт Эвксинский – 2015» (Севастополь, ФГБУН ИМБИ, 17–20 ноября 2015 г.);

21. III Всероссийской конференции «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем» (САМЭС) под эгидой объединенной конференции «Экология. Экономика. Информатика» (п. Дюрсо Краснодарского края, 6–12 сентября 2015 г.);

22. Молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, ФГБУН МГИ, 25–29 апреля 2016 г.);

23. V Международной конференции молодых ученых (лимнологической школе-практике) «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 5–8 сентября 2016 г.);

24. IV Всероссийской конференции «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем» (САМЭС) под эгидой объединенной конференции «Экология. Экономика. Информатика» (п. Дюрсо Краснодарского края, 11–17 сентября 2016 г.);

25. Научной конференции «Мировой океан: модели, данные, оперативная океанология» (Севастополь, ФГБУН МГИ, 26–30 сентября 2016 г.);

26. IV Всероссийской конференции по прикладной океанографии (Москва, ГОИН, 1–2 ноября 2016 г.);

27. II Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (Ялта, Республика Крым, 11–17 сентября 2017 г.);

28. XXV Международной научно–технической конференции «Прикладные задачи математики» (Севастополь, СевГУ, 18–22 сентября 2017 г.);

29. Научной конференции «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (Севастополь, ФГБУН МГИ, 3–7 октября 2017 г.);

30. III Международной научной школе молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, ИПМех РАН, 1–3 ноября 2017 г.);

31. Международной молодёжной научной конференции «Океанология в XXI веке: современные факты, модели, методы и средства», в рамках научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук (Ростов-на-Дону, 13–16 декабря 2017 г.);

32. International conference «Fluxes and structures in fluids» (Vladivostok, Russia, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 8–14 August 2018);

33. III Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, Республика Крым, 10–16 сентября 2018 г.);

34. 26-й международной научно–технической конференции «Прикладные задачи математики» (Севастополь, СевГУ, 17–21 сентября 2018 г.);

35. I Всероссийской научной конференции школьников, студентов и молодых ученых «Морские исследования и рациональное природопользование» (Севастополь, Филиал МГУ в г. Севастополе, 19–23 сентября 2018 г.);

36. Всероссийской научной конференции «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (Севастополь, ФГБУН МГИ, 24–28 сентября 2018 г.);

37. Четвертой международной научной школе молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, ИПМех РАН, 24–26 октября 2018 г.);

38. IV Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», (Севастополь, ФГБУН МГИ, 22–26 апреля 2019 г.);

39. Всероссийской научной конференции «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (Севастополь, ФГБУН ФИЦ МГИ, 23–28 сентября 2019 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 56 научных работ, из которых 15 статей в рецензируемых научных журналах [35, 40, 36, 37, 41, 53, 58, 62, 102, 109, 127, 167, 169, 182, 196], 3 статьи в рецензируемых сборниках научных трудов [38, 119, 126] и 38 тезисов и материалов докладов на Всероссийских и Международных конференциях [3, 4, 25, 27, 39, 45, 59, 61, 63, 101, 103, 106–108, 110–118, 120–125, 129, 135, 136, 174, 192].

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 8 работ [35, 58, 62, 109, 167, 169, 182, 196]. В их числе 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы SCOPUS [167, 182] и Web of Science [169, 196], и 2 работы [35, 58] 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».

Связь диссертационной работы с научными программами. Результаты, положенные в основу диссертационной работы, были получены соискателем в качестве исполнителя по следующим научным программам.

Темы и проекты по Плану исследований НАН Украины:

1. тема «Фундаментальные и прикладные физико-климатические исследования морской среды и климатической системы океан–атмосфера», ГР № 0106U001406 (2006–2010 гг.);

2. тема «Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования морской среды с целью устойчивого, экологически и техногенно безопасного использования ее ресурсного потенциала», ГР № 0107U004396 (2009 г.);

3. тема «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий», ГР № 0111U001420 (2011–2015 гг.);

4. совместный проект НАН Украины и РФФИ «Исследование особенностей формирования и изменчивости циркуляции вод Черного моря на основе мультимодельного подхода», ГР № 0112U004272 (2012–2013 гг.);

5. тема «Черное море как имитационная модель океана», ГР № 0112U001884 (2011–2015 гг.).

Проекты, включенные в планы исследований РАН:

6. № 1002-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (2015–2016 гг.);

7. № 1002-2014-0011 «Исследования закономерностей изменения морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (2015–2017 гг.);

8. № 0827-2019-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (2018–2020 гг.);

Проекты РФФИ:

9. 10-05-90903 моб_снг_ст (стажировки по программе мобильности молодых ученых из стан СНГ) «Научная работа украинского молодого ученого Марковой Натальи Владимировны из Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины, г. Севастополь, в Южном отделении Учрежде-

ния Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Геленджик-7» (2010 г.);

10. 14-45-01641 p_юг_a «Численный анализ мезомасштабных вихрей и течений в районе юго-восточного побережья Крыма в осенний период» (2014 г.);

11. 15-05-05423 А «Численный анализ мезо- и субмезомасштабных особенностей прибрежной циркуляции Черного моря» (2015–2017 гг.);

12. 16-05-00264 А «Динамическая и термохалинная структура вихрей Черного моря по данным спутниковой альтиметрии, численного моделирования и измерений буев-профиломеров Арго» (2016–2018 гг.);

13. 18-05-00353 А «Исследование глубоководной циркуляции Черного моря на основе результатов мультимодельных численных экспериментов и данных натурных наблюдений» (2018–2020 гг.).

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 данных гидрофизического реанализа [171] 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 [144], 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 дан-

ных наблюдений из Банка океанографических данных МГИ (БОД МГИ), измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик», оценка течений по данным ARGO.

Соискатель выражает искреннюю признательность и благодарность за сотрудничество, содействие и поддержку всем соавторам: А.В. Багаеву, С.Г. Демьшеву, 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 [6], С.Г. Демьшева и О.А. Дымову [77, 168], В.Л. Дорофеева и Л.И. Сухих [171], П.Н. Лишаева и В.В. Кныша [144], А.Г. Островского и А.Г. Зацепина [138], М.В. Шокурова и Д.А. Яровую [68].

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

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 положения, выносимые на защиту. Отмечается теоретическая и прак-

тическая 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.

В Разделе 1 рассматриваются особенности глубоководных течений Черного моря на основе данных натурных наблюдений. В первом подразделе проводится обзор литературных источников. В последующих подразделах выполняется исследование особенностей глубоководных течений Черного моря на основе архивов данных многолетних натурных наблюдений. Проводится анализ глубоководных измерений скорости течений, полученных в период 1960–2016 гг. в ходе ряда научных экспедиций и собранных в БОД МГИ. На основе находящегося в открытом доступе массива данных автономных дрейфующих буев-профилемеров ARGO рассчитываются средние скорости глубоководных течений в окрестностях парковочных горизонтов буев. По данным многолетних глубоководных измерений температуры и солёности на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» вычисляются скорости геострофических течений. Рассматриваются данные измерений скорости, полученные в ходе глубоководной съемки с помощью зондирующего комплекса «Аквалог» [138]. Сопоставляются и обобщаются результаты анализа наблюдений, проводится оценка интенсивности и изменчивости глубоководных течений по рассмотренным массивам натурных данных.

Раздел 2 посвящен изучению особенностей климатических течений Черного моря на основе результатов численного моделирования. Приводится постановка задачи, описание численной модели МГИ. С ассимиляцией климатических гидрологических данных о температуре и солёности [6] выполняется численный эксперимент по моделированию климатических полей Черного моря на сетке с горизонтальным разрешением 5 км. Результаты проведенного эксперимента анализируются как для верхнего слоя, так и слоя вод под основным пикноклином. Детально рассматриваются особенности глубоководных климатических течений, показывается наличие течений антициклонической направленности (АЦТ) в северной и северо-восточной частях моря.

В Разделе 3 выполняется анализ глубоководной динамики Черного моря на основе данных численных расчетов, проведенных с использованием модели МГИ и реальных атмосферных условий. Расчеты гидрофизических полей осуществлялись в рамках различных научных проектов, для временных интервалов от нескольких суток (моделирование отклика моря на воздействие квазитропического циклона) до нескольких лет (ретроспективный анализ гидрофизических полей) и ранее не применялись для исследования глубоководной циркуляции. В Разделе 3 собраны и анализируются следующие массивы данных:

– прогностических численных экспериментов по воспроизведению динамики Черного моря с горизонтальным разрешением 1,6 км, рассчитанные в работах С.Г. Демьшева, О.А. Дымовой [77, 168];

– гидрофизического реанализа для периода 1992–2012 гг., с горизонтальным разрешением 4,8 км, полученные Дорофеевым В.Л., Сухих Л.И. [171] (проект *MyOcean* [86, 170]);

– ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря на расчетной сетке 4,8 км, полученные Коротаевым Г.К., Лишаевым П.Н., Кнышом В.В. [144] в рамках проекта РФФИ № 16-05-00621_А;

– численных экспериментов по расчету гидрофизических полей Черного моря в условиях экстремального атмосферного воздействия, полученных в работах диссертанта [35, 40, 135, 136].

Установленные по результатам анализа расчетов с реальным атмосферным воздействием особенности глубоководных течений сравниваются и обобщаются. Проводится сопоставление результатов всех численных экспериментов и выполненных на основе данных натуральных наблюдений оценок скоростей глубоководных течений Черного моря. Приводятся свидетельства наличия глубоководных течений антициклонической направленности в результатах расчетов на основе других численных моделей, показывается соответствие установленных характеристик глубоководных течений имеющимся в литературе гипотезам их формирования.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертации.

РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1 Обзор литературных источников

В последние годы фундаментальные исследования структуры и физических механизмов циркуляции Черного моря активно дополняются работами по наблюдению и моделированию процессов, происходящих в его верхнем слое (0–300 м). Эта часть моря характеризуется наибольшими градиентами температуры и солености и наиболее активной динамикой.

В настоящее время хорошо известны основные особенности верхнего слоя вод Черного моря [76, 196]. Вертикальная термохалинная структура характеризуется наличием верхнего квазиоднородного слоя и сезонного (весенне-летнего) термоклина, связанных с процессом ветрового перемешивания и годовым циклом потока тепла через поверхность моря. С образованием летнего термоклина связано формирование сезонного скачка плотности на глубинах 15–20 м – сезонного пикноклина (градиент плотности в среднем $0,2\text{--}0,3\text{ кг/м}^2$). Воды холодного промежуточного слоя (ХПС) – слоя подповерхностного минимума температур на глубинах примерно 30–100 м ограничиваются изотермой $+8\text{ }^\circ\text{C}$. На горизонтах до ~300 м (ядро на глубинах 50–100 м) располагаются воды основного (постоянного) пикноклина – слоя максимума вертикального градиента плотности ($0,02\text{--}0,04\text{ кг/м}^2$), характерного для всех сезонов, при этом плотность определяется преимущественно соленостью. Наличие постоянного пикноклина затрудняет вертикальный обмен в Черном море. Под пикноклином температура и соленость медленно возрастают ко дну.

Особенности течений в верхнем слое Черного моря были установлены и многократно подтверждены в работах [10, 11, 57, 70, 99, 105, 153, 176, 203] на основе данных натурных наблюдений, а также воспроизведены в результатах моделирования [2, 50, 80, 88, 187, 207, 214, 220, 222]. Основными составляющими системы поверхностных течений являются: Основное черноморское течение (ОЧТ) –

кольцевое, циклоническое, шириной 40–80 км, распространяющееся по периферии бассейна над материковым склоном со средней скоростью 30–50 см/с; суббассейновые циклонические круговороты, охватывающие западную и восточную части моря («очки Книповича»); квазистационарные мезомасштабные антициклоны (Севастопольский, Батумский, Синопский и пр.), а также цепочки нерегулярных антициклонических вихрей между ОЧТ и берегом, возникающие преимущественно в летний сезон, во время ослабления и меандрирования ОЧТ. Изучению структуры и пространственно-временной изменчивости поверхностной циркуляции уделяется достаточно много внимания, и работы в этом направлении продолжаются [196].

Вместе с тем, динамика Черного моря под основным пикноклином по-прежнему остается малоизученной. Ключевой проблемой при изучении глубинных слоев является недостаток данных глубоководных натуральных наблюдений, который не преодолен по настоящее время, и в ближайшей перспективе решение этого вопроса не предвидится. Количество гидрологических данных, накопленных за всю историю проведения измерений на глубине 500 м – в 12 раз, а на горизонте 2000 м – в 100 раз меньше по сравнению с их количеством в верхнем слое [7, с. 50].

Черноморские воды на глубинах более 200 м содержат сероводород, и в них нет необходимого для существования большинства живых организмов кислорода. Вследствие этого глубинные воды – если не принимать в расчет анаэробных бактерий – необитаемы и не представляют интереса для хозяйственной деятельности, что в свою очередь не стимулирует проведения новых прикладных исследований. В то же время, ярким примером того, как недостаток информации о динамике глубинных слоев мог привести к непоправимым последствиям, является попытка захоронения отходов ядерной промышленности в глубоководной зоне Черного моря. До середины XX в. мировое научное сообщество было убеждено, что глубинные слои Черного моря практически неподвижны и что полное обновление вод Черного моря совершается за достаточно длительный период в 1500–2500 лет, превышая период полураспада радиоактивных изотопов, предполагавшихся к за-

хоронению. Этим фактом обосновывался план представителей некоторых западных стран организовать свалку ядерных отходов в глубоководной части Черного моря. Однако оценки, выполненные советскими учеными, начиная с работ Водяницкого [20], а также в исследованиях сотрудников МГИ Беляева В.И., Колесникова А.Г., Нелепо Б.А. [8, 9], доказали наличие значительно более интенсивного обмена между глубинными и поверхностными слоями, о чем был сделан ряд докладов на мероприятиях мирового уровня. Было показано, что вертикальное перемешивание вод Черного моря происходит на всех горизонтах и – значительно быстрее, чем полагалось ранее: рассчитанный тогда период обновления вод сероводородного слоя составил 100–140 лет. Представленная в комиссию МАГАТЭ при ООН и озвученная на Ассамблее ЮНЕСКО, эта информация послужила решающим аргументом против захоронения радиоактивных отходов и предотвратила экологическую катастрофу, стимулировав изучение структуры вод Черного моря в последующий период.

Постепенно получаемые и накапливаемые данные научных экспедиций анализировались в ряде работ [10, 11, 78, 99, 104, 105, 153, 185]. Было установлено, что поле скоростей в глубинных слоях заметно отличается от поверхностного, что на глубинах более 300–500 м единый круговорот ОЧГ отсутствует, а значения скоростей в среднем на порядок меньше, чем на поверхности.

Изменчивость гидрофизических полей на внутригодовом и сезонном масштабах в глубинных слоях Черного моря – из-за отсутствия достаточного количества данных натурных наблюдений – была обнаружена довольно поздно, только в конце 80-х годов XX в., благодаря обработке новых данных, полученных в ряде последовавших в это время масштабных экспедиций на НИС по Черному морю. Так, в исследовании [201] на основе данных, полученных в 1988 г. в рейсе на НИС «Кнопг», впервые было установлено, что под основным пикноклином также формируются и эволюционируют свои вихревые структуры и течения, хотя и со значительно меньшими скоростями, чем вблизи поверхности. В работах [185, 205] было показано, что циркуляция в глубинных слоях, сохраняя циклоническую направленность, изменяется во времени, а динамические поверхности отражают на-

личие множества вихревых образований. Описание конкретных локальных динамических структур (вихрей, течений) содержится преимущественно в публикациях по результатам соответствующих научных экспедиций [23, 64, 132, 201, 202, 205, 206]. Средние скорости течений под основным пикноклином оцениваются в этих работах в диапазоне от 1 до 5 см/с.

Сейчас принято считать, что направление глубоководной циркуляции в основном согласуется с направлением циркуляции в верхнем слое. Однако на протяжении уже нескольких десятков лет периодически поднимается вопрос о наличии глубоководного противотечения антициклонической направленности под ОЧТ. Еще в 1942 г. Г. Нейманом была выдвинута гипотеза о существовании в глубинных слоях Черного моря антициклонической циркуляции [203]. Им предполагалось наличие двухслойной системы течений: с циклонической направленностью в верхнем слое (до глубин ~300 м) и с антициклонической – на нижележащих горизонтах при усилении скорости течений на глубинах около 1000 м. С тех пор попытки показать и объяснить наличие антициклонического противотечения в глубинных слоях предпринимались разными авторами [19, 50, 65, 87, 137, 145, 146, 152, 221]. В работах [12, 16, 17] была показана возможность формирования противотечения в слое основного пикноклина, в [16] были проведены расчеты и лабораторные эксперименты в подтверждение наличия противотечения на горизонтах 100–400 м и трехслойной стратификации черноморских вод. Примеры формирования нерегулярных и непродолжительных обратных течений приведены также в публикациях [14, 95, 153, 154]. В работе [140] была показана антициклоническая направленность придонных течений [51, 196].

Выводы о вероятном существовании в глубинах Черного моря антициклонической циркуляции бассейнового масштаба или ее элементов делались, в том числе, с привлечением доступных к тому моменту натурных данных, однако на основе очень ограниченного их количества. Кроме того, расчет скорости глубоководных течений основывался на использовании данных наблюдений температуры и солености, имеющих в глубинных слоях небольшие вертикальные градиенты, и лишь в отдельных случаях вычисления подкреплялись результатами прямых из-

мерений скорости. Все это давало повод сомневаться в сделанных выводах. Весомым контраргументом послужил также анализ траекторий автономных профилирующих буев и расчеты средних скоростей на горизонтах их дрейфа, проведенные в 2006 г. [185] и в 2011 гг. [21], которые не подтвердили наличия подобных особенностей поля течений.

В связи с интенсивным развитием моделей динамики океана в последние годы появилась возможность достаточно подробно численно воспроизводить трехмерную структуру вод. И хотя детально глубоководные течения не исследовались, в ряде работ были отмечены интересные особенности. Так, например, проведенный в МГУ на основе Бергенской модели эксперимент [2] показал наличие в Черном море противотечения в климатических полях на глубинах более 1300 м во все сезоны [51]. Глубоководные течения антициклонической направленности фиксировались также в недавних результатах моделирования климатических полей Черного моря по модели ИВМ [102], прогностических расчетах с помощью моделей INMOM [89] и NEMO [164], в реанализе на основе модели МГИ [173]. Однако, эти результаты, как и результаты любого моделирования, все же требуют сопоставления с натурными данными. Поэтому провести анализ имеющихся на современном этапе данных натуральных наблюдений и оценить интенсивность и изменчивость глубоководных течений на их основе – вот задача текущего раздела диссертации.

1.2 Анализ данных измерений глубоководных течений Черного моря из Банка океанографических данных МГИ

Для исследования глубоководных течений Черного моря из Базы течений БОД МГИ [141, 160], содержащей данные о 1033 станциях измерений скорости течений, были отобраны только данные глубоководных станций – тех, где измерения течений были произведены до горизонтов не менее 500 м [182]. Совместно эти данные для изучения глубоководной циркуляции ранее не использовались.

При запросе данных глубоководных станций выяснилось, что в архиве БОД МГИ находится информация о более чем 40 тыс. единичных (мгновенных) измерений скорости, однако все они были получены только на 25 глубоководных станциях (менее 3 % общего количества). Большая часть измерений (18 станций), была проведена в советский период 1960–1992 гг. и еще 7 станций выполнены в 2016 г. при помощи современного погружного зонда LADCP (*Lowered Acoustic Doppler Current Profiler*).

Столь ограниченное количество имеющихся в наличии данных обуславливается несколькими факторами. Во-первых, измерения течений в ходе научных экспедиций часто производились разными организациями и группами исследователей, и полученные данные могли остаться исключительно в их пользовании. Во-вторых, многие данные не были перенесены с бумажных носителей в цифровой формат и впоследствии были попросту утеряны. Еще часть полученных данных изымалась из соображений секретности. Кроме того, с развалом Советского Союза экспедиционная деятельность в целом значительно сократилась. В настоящее время информация Базы течений БОД МГИ постепенно пополняется новыми данными LADCP–измерений скорости, ведется работа по восстановлению архивов, однако процент данных на горизонтах более 500 м по-прежнему невелик.

Анализируемая далее выборка глубоководных наблюдений течений БОД МГИ содержит информацию о каждой из 25 станций (расположение показано на Рисунке 1.1). Данные включали: номер рейса НИС, время, широту, долготу, горизонт измерений, модуль и направление течений, тип прибора-измерителя. Как видно из указанного рисунка, глубоководные станции выполнялись преимущественно в центральной части моря к югу от Крымского полуострова. Суммарно было рассмотрено более 40 тыс. измерений, выполненных в 1960 г. – с дискретностью 1 ч, 1975 г. – с дискретностью 15 мин., 1988 г. – с дискретностью 10 мин., 1991 и 1992 гг. – с дискретностью 10 мин. [182]. В 2016 г. глубоководные измерения скорости, проводимые с помощью LADCP, выполнялись на каждой станции (№№ 19–25) однократно и содержат информацию только об 1 профиле, общее время выполнения которого – около 3 ч, дискретность данных по глубине состав-

ляет 1 м. Поэтому для указанных станций в дальнейшем осреднение производилось не по временному интервалу, а по данным измерений скорости в окрестностях рассматриваемых горизонтов.

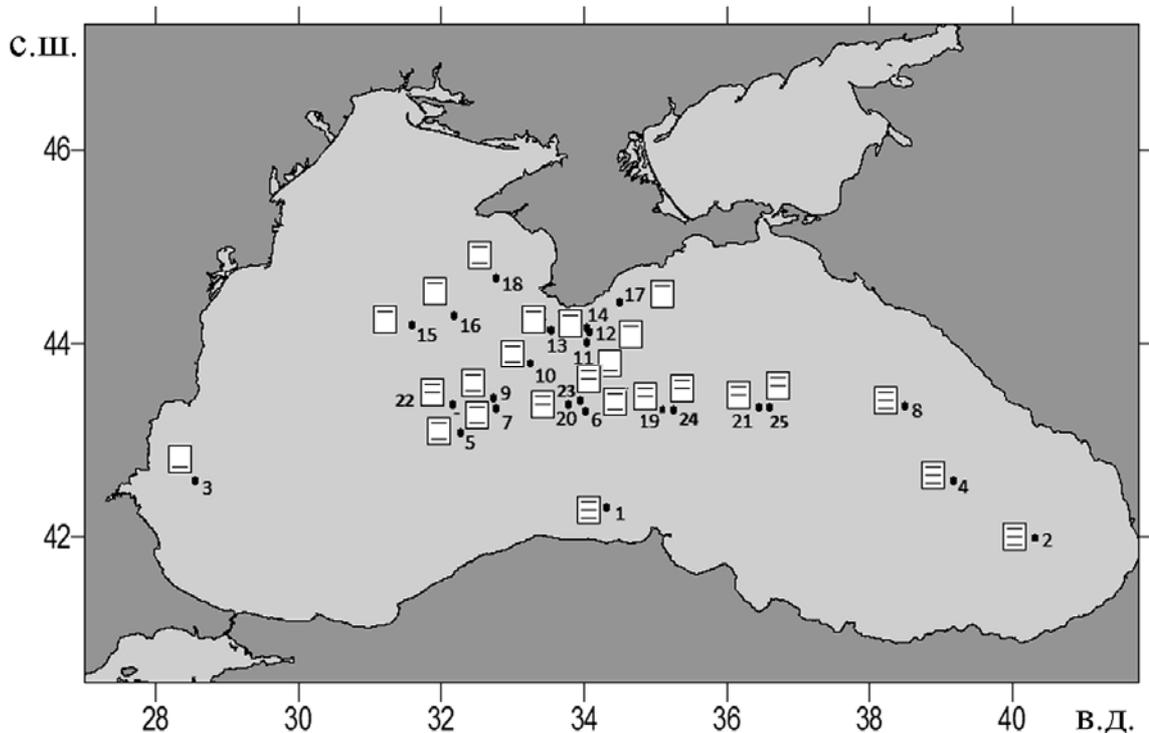


Рисунок 1.1 – Пространственное положение станций измерений течений (черные точки). Горизонтальные полосы на пиктограммах обозначают наличие измерений на глубинах: верхняя – на 500 м, средняя – на 750 м, нижняя – на 1000 м

Основные сведения о глубоководных станциях представлены в левой части Таблицы А.1 Приложения А, где указаны номер станции (согласно Рисунку 1.1), год и месяц измерений, номер рейса НИС (если измерения выполнялись с борта судна), количество проведенных измерений и тип прибора-измерителя. В случае отсутствия части информации в БОД МГИ, в соответствующей ячейке проставлен прочерк. Основные характеристики использовавшихся приборов также приведены в Приложении А, более детальные сведения об измерителях течений можно почерпнуть из работы [148].

Наибольшее количество измерений скорости (около 35 тыс.) было выполнено на горизонте 500 м, на горизонте 750 м – немногим более 3 тыс., а на горизонте

1000 м – около 5 тыс. измерений. Дополнительно были рассмотрены измерения на верхнем горизонте 5/10/15 м (глубина варьировала в зависимости от станции).

Статистика направлений и скорости течений приведена в правой части Таблицы А.1. Не на каждой станции измерения проводились на всех указанных выше горизонтах. Кроме того, в некоторых случаях было сложно выполнить статистическую оценку данных в силу того, что значительное количество измеренных значений оказались ниже порога чувствительности прибора-измерителя (менее 2 см/с), наличие таких данных показано в таблице звездочкой [182]. Так, данные станций №№ 4, 6 и 8, выполненных в октябре 1960 г., содержали только от 1 до 34 % достоверных измерений: на станции № 4 лишь 1 % данных оказался выше порога чувствительности прибора, на станции № 6 было от 17 до 20 % достоверных значений, на станции № 8 – 34 % измерений на горизонте 500 м и 15 % – на горизонте 1000 м.

На других станциях количество измерений ниже порога чувствительности прибора было меньше и не превышало 25 %, но их наличие также создавало проблему: с одной стороны, малые значения скорости неточны, и их следовало бы исключить из выборки, но тогда оценка средней скорости будет завышенной. Но и не принимать во внимание подобные измерения было бы некорректно, поскольку присутствие очень слабых течений также является характеристикой циркуляционных процессов. Поэтому для повышения достоверности средних оценок был использован подход, примененный ранее в работе [218] и позволяющий учитывать в исследовании большее количество собранных данных. Основная идея его заключалась в использовании для статистической оценки выборки данных не среднего значения и СКО, а медианы и квартилей выборки данных. Согласно такому подходу, для каждой станции и на каждом рассматриваемом горизонте рассчитывались медиана и квартили абсолютной величины скорости, а также преобладающее направление течений и его повторяемость в пределах третьего квартиля. Исключение из рассмотрения значений выше третьего квартиля скорости позволило отфильтровать самые высокие и редко встречающиеся значения («выбро-

сы»). Примеры построенных по фильтрованной выборке диаграмм направлений и модуля скорости течений приведены на Рисунках 1.2 и 1.3 [182].

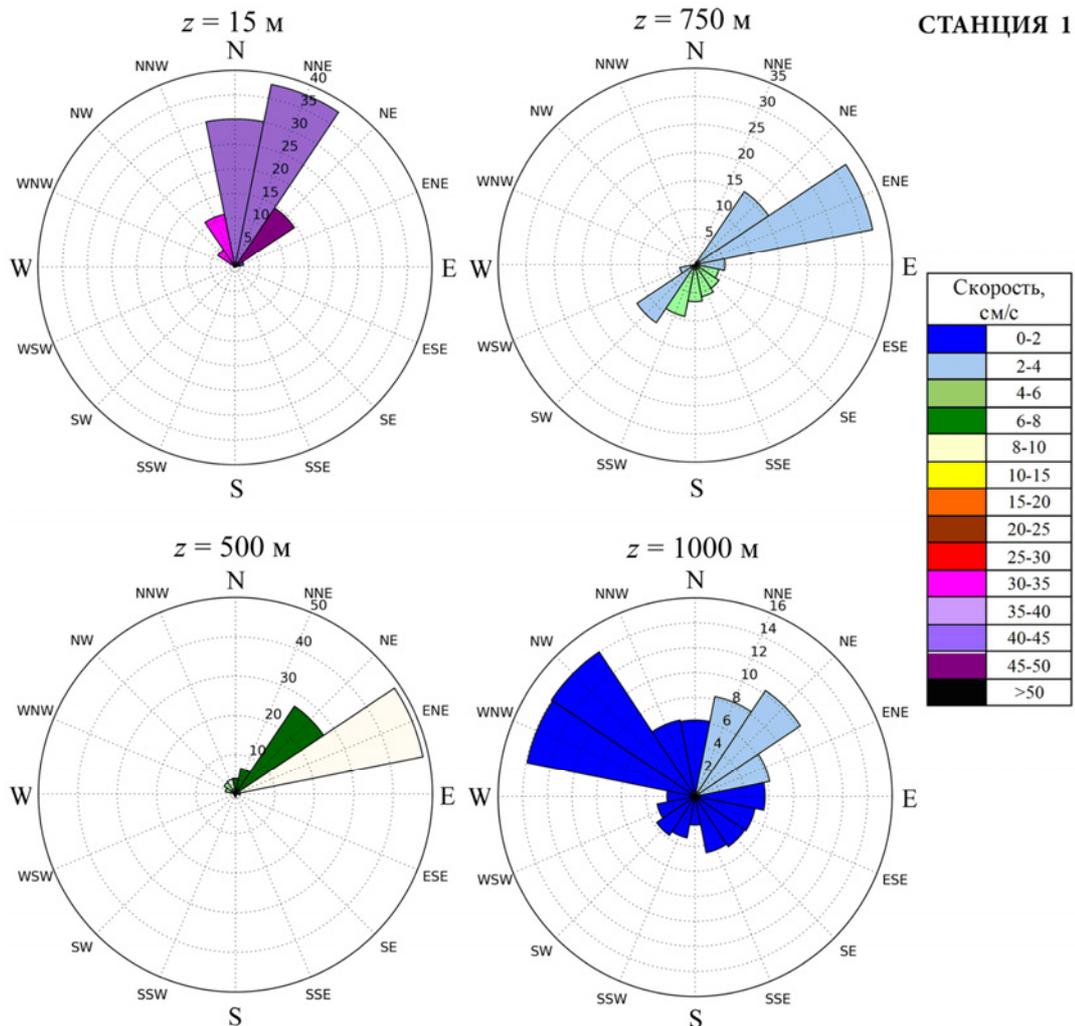


Рисунок 1.2 – Диаграммы направлений и модулей скоростей течений на станции № 1 (на радиальной оси отложен процент повторяемости направления, диапазоны скорости показаны цветом)

Дальнейший анализ данных показал, что на станциях № 1, 3, 15, 16, 18, 22, 23, 24 течения от поверхности до нижнего горизонта измерений постепенно ослабевали. Например, на станции № 1 (Рисунок 1.2), выполненной в южной половине бассейна вблизи центральной части Анатолийского побережья, зафиксировано постепенное убывание скоростей течений с удалением от поверхности: от 40 см/с на глубине 15 м до 7–8 см/с на горизонте 500 м, 4 см/с – на глубине 750 м и 2 см/с – на горизонте 1000 м. Направление течений по глубине на данной станции было

практически постоянным [182]. Отраженный на соответствующей диаграмме поворот вектора скорости на глубине 1000 м определялся только наличием измерений менее 2 см/с, которые ниже порога чувствительности прибора-измерителя и не принимались к рассмотрению.

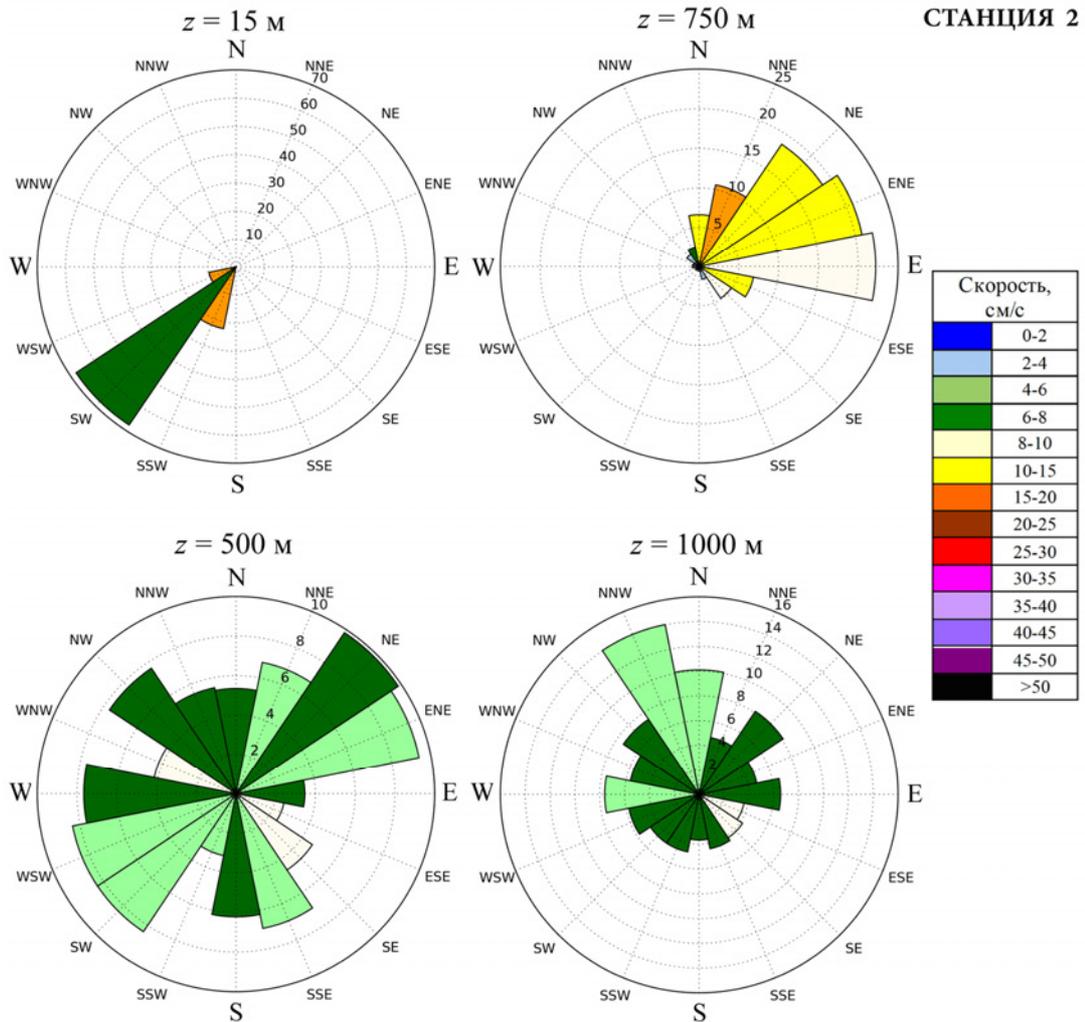


Рисунок 1.3 – Диаграммы направлений и модулей скоростей течений на станции № 2 (на радиальной оси отложен процент повторяемости направления, диапазоны скорости показаны цветом)

На станциях № 9 и 10 значение скорости в слое 500–1000 м не менялось и составляло 8 см/с, направление отличалось в пределах 90–110°. На ряде станций (№ 5, 7, 12, 13, 14, 17) наблюдалось усиление скорости течений от поверхности до максимальной глубины измерений (500–1000 м) [182]. На станциях № 2, 19, 20,

21, 25 отмечено усиление течений между горизонтами 500 и 750 м (от 2–4 до 8–12 см/с). К примеру, на станции № 2 (Рисунок 1.3) на глубине 750 м направление течения более стабильно, чем на выше- и нижележащем горизонтах 500 и 1000 м, и медиана модуля скорости здесь больше и составила 7 см/с (против 3 см/с и 4 см/с, соответственно). Средняя скорость за весь 11-суточный период наблюдений на данной станции на горизонте 750 м составила 8 см/с (дискретность наблюдений 15 мин.). Также нужно отметить, что преобладающее направление течений на горизонте 750 м противоположно направлению течений у поверхности.

Медиана значений скорости по данным всех многосуточных станций находилась в следующих диапазонах: у поверхности от 4 до 32 см/с, на глубине 500 м – от 2 до 35 см/с (причем высоких для данных горизонтов скоростей в исходных данных на станциях 12, 13, 14 и 17 было значительное количество), на горизонте 750 м – от 4 до 7 см/с и на горизонте 1000 м – от 2 до 12 см/с. Исключение из рассмотрения на горизонте 500 м данных указанных 4-х станций, выполненных на НИС «Трепанг» в сентябре 1991 г., дает более реалистичное значение медианы на оставшихся станциях – от 3 до 8 см/с.

Тем не менее, согласно имеющимся данным, на глубине 500 м на 11 станциях из 22, где были выполнены измерения на данном горизонте, медиана скорости превышала 5 см/с, а на 4 из них была выше 10 см/с. На горизонте 750 м на 5 станциях из 11 медиана скорости была более 5 см/с, на 1 из станций составила 12 см/с. На глубине 1000 м на 5 станциях из 12 скорость была выше 5 см/с, и на 2 станциях была равна 12 см/с.

Для сравнения, для станций, где количество измерений ниже порога чувствительности прибора не превышало 25 %, были рассчитаны средние скорости течений с предварительной фильтрацией априори недостоверных значений ниже 2 см/с. Как видно из Таблицы А.1, средняя скорость, рассчитанная таким образом, оказалась ожидаемо выше медианы, разница составила 2–3 см/с вблизи поверхности (на 11 станциях из 16), на горизонте 500 м – на 4 станциях из 22 и на 1 станции из 10 – на горизонте 1000 м. В остальных случаях отличия были меньше (0–

1 см/с), но в целом использование для оценки течений подхода [218] и медианных значений позволило избежать завышения средних оценок скорости.

Таким образом, было показано, 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 [182].

На ряде станций обнаруживается увеличение скоростей течений на глубинах более 500 м. Усиление течений и смена направления скорости на отдельных глубоководных горизонтах являются свидетельствами сложной трехмерной структуры поля скорости под основным пикноклином. Более детальному описанию особенностей динамических структур на основе измерений скорости препятствует низкая обеспеченность данными наблюдений.

Итак, с помощью информации БОД МГИ показаны отдельные особенности глубоководных течений Черного моря, однако для восстановления полной трехмерной картины течений накопленных данных измерений скорости недостаточно. Поэтому далее к рассмотрению принимаются другие источники данных глубоководных наблюдений.

1.3 Оценка скоростей глубоководных течений Черного моря по данным автономных буюв-профилемеров ARGO

1.3.1 Использование данных ARGO для расчета скоростей течений. Относительно новым источником получения информации о параметрах морской среды на регулярной основе являются наблюдения, проводимые с помощью системы автономных буюв-профилемеров ARGO, получившей развитие в 1999 г. в рамках международного проекта по мониторингу Мирового океана [180, 212]. В океане такой буй (поплавок, *profiling float*) дрейфует на запрограммированной,

т.н. парковочной глубине, периодически всплывая к поверхности для передачи собранной информации через спутник (Рисунок 1.4) [128]. В Черном море наиболее распространенная периодичность коммуникации буев со спутником составляет 5 суток. Приборы, которыми снабжаются поплавки ARGO, не измеряют скорости течений напрямую. Однако, по данным о позиционировании этих буев можно сделать оценки средних скоростей течений на их парковочных глубинах [213], используя их таким образом в качестве лагранжевых трассеров.

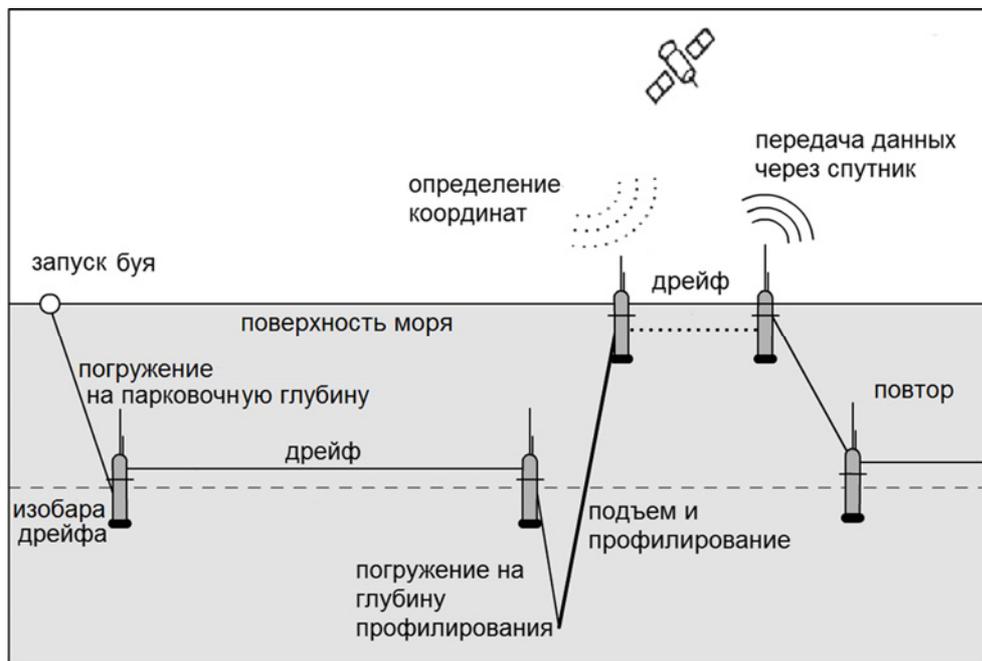


Рисунок 1.4 – Пример рабочего цикла буя-профилера ARGO

Несмотря на огромное количество исследований с использованием данных ARGO в глобальном масштабе, работ по оценке скоростей течений Черного моря на их основе совсем немного. Первая подобная работа по расчету скорости течений по данным позиционирования 3 всплывающих буев-профилеров была опубликована в 2006 г. [185]. В статье [21], вышедшей в свет в 2011 г., были применены данные за 2002–2009 гг., полученные с помощью уже 7 запущенных к тому времени буев. Исследование [199] на основе 5-летнего массива данных было опубликовано в Софийском университете в 2016 г. В данном подразделе для оценки скорости течений используется наиболее полный, 10-летний массив изме-

рений ARGO, что позволило рассмотреть динамику глубоководных течений более детально как в целом, так и в определенных слоях по глубине.

Проведенные ранее расчеты лагранжевой скорости по данным спутникового позиционирования показали следующие результаты. В работе [185] средняя скорость буя в ОЧТ на горизонте 200 м оценена в 7 см/с, на горизонте 750 м – около 4 см/с, и на глубине 1550 м – от 1 до 5 см/с. В исследовании [21] получено, что за все время измерений средние скорости движения буев с парковочными глубинами 750–1550 м составляют 2,2–2,7 см/с, а на парковочном горизонте 500 м – 4 см/с. В публикации [199] рассматривались буи с парковочными глубинами 200–1000 м, было показано, что скорости течений с глубиной уменьшаются, а в летний период течения слабее, чем в остальные сезоны. Рассчитанные авторами скорости на глубине 750 м составили до 10 см/с, а на глубине 1000 м были в диапазоне 1–5 см/с.

1.3.2 Расчет скоростей глубоководных течений. В представленной работе, как и в указанных предшествующих, был применен простой метод вычисления средней скорости течений – как отношение пройденного буюм пути к соответствующему временному интервалу. Время и путь между двумя последовательными станциями определялись по позиционированию буя на поверхности через спутниковые системы. На погрешностях такого метода расчета и возможных способах их устранения остановимся ниже.

Основываясь на данных [159, 179] о траекториях поплавков ARGO и выполненных ими профилях в Черном море за 10-летний период (с марта 2005 г. по апрель 2015 г.), были вычислены средние скорости глубоководных течений на горизонтах 350–1600 м. Такой диапазон глубин обусловлен следующими соображениями. Основное количество измерений в Черном море было выполнено с помощью буев, дрейфующих на парковочных глубинах 200, 450, 500, 750, 1000, 1300 и 1500 м. Данные наблюдений поплавков с парковочной глубиной 200 м в исходную выборку не включались: они дрейфовали в пикноклине и переносились более быстрыми течениями. Таким образом, в качестве верхней границы выборки была изначально взята парковочная глубина буев 450 м, а нижняя граница выборки обусловлена предельной глубиной дрейфа поплавков с учетом возможных откло-

нений. В силу особенностей рельефа буи зачастую дрейфовали выше своих парковочных горизонтов, и это позволило поднять верхнюю границу первого рассматриваемого слоя до 350 м. В итоге для исследования были отобраны данные 16 буев (№№ 7900465, 7900466, 6901899, 6900803, 6900804, 6900805, 6901895, 7900590, 7900593, 7900591, 7900592, 5902291, 4900489, 4900540, 4900541, 4900542). Длительность рабочего цикла для рассмотренных буев составляет 5 суток (120 ч), средняя продолжительность дрейфа на поверхности – около 10 ч [196].

Несмотря на то, что данные ARGO проходят предварительную проверку перед их размещением в открытом доступе, скачанные массивы [159] были подвергнуты дополнительному контролю. Нужно было убедиться в адекватности траекторий буев, т.е. в их расположении в границах Черного моря и реалистичном изменении координат со временем (и такая проверка оказалась оправданной, данные по нескольким станциям были отбракованы), а также в достижении отобранными буйами глубины более 300 м при их погружении на парковочный горизонт. Иногда вследствие особенностей рельефа дна поплавки дрейфовали на глубинах меньших заданных парковочных, но, согласно приведенным в [159, 179] флагам качества, данные измерений при этом записывались корректно. В связи с этим векторы скорости могли быть рассчитаны не только на горизонтах дрейфа, но и дополнительно в некоторых их окрестностях (слоях). Слои выбирались с учетом преобладающих значений парковочных глубин: 350–600 м (парковочные глубины 450 и 500 м), 600–800 м (парковочная глубина 750 м), 800–1200 м (парковочная глубина 1000 м), 1200–1600 м (парковочные глубины 1300 и 1500 м). Таким образом было рассчитано и распределено по четырем слоям 1558 векторов скорости. Отдельные значения, превышающие 25 см/с, были получены только в слое 350–600 м, при этом их вклад составил менее 1 % [196].

Построенные массивы содержали также около 12% векторов скорости с малыми модулями (менее 1 см/с, медиана 0,8 см/с). Погрешность их вычисления при выбранном способе расчета сравнима с величиной самого вектора. Согласно результатам работы [184], скорости менее 1 см/с являются существенно неустойчи-

выми и требуют коррекции. Полученные малые векторы разнонаправлены и сосредоточены в основном в западной части моря. Их природа требует дополнительного анализа и уточнения, но такие малые значения получаются, в частности, вследствие попадания поплавка в вихревую структуру и движения по практически замкнутому контуру – тогда за период между предыдущим и последующим позиционированиями буя на поверхности его координаты меняются незначительно. Исходя из этого, для увеличения точности оценки средней скорости течений, такие векторы из дальнейшего рассмотрения были исключены [196].

1.3.3 Анализ результатов расчета скоростей. По данным спутникового позиционирования рассматриваемых буев для периода 23.03.2005– 29.04.2015 были построены карты их траекторий (Рисунок 1.5). При создании рисунка использован сервис сайта [159].

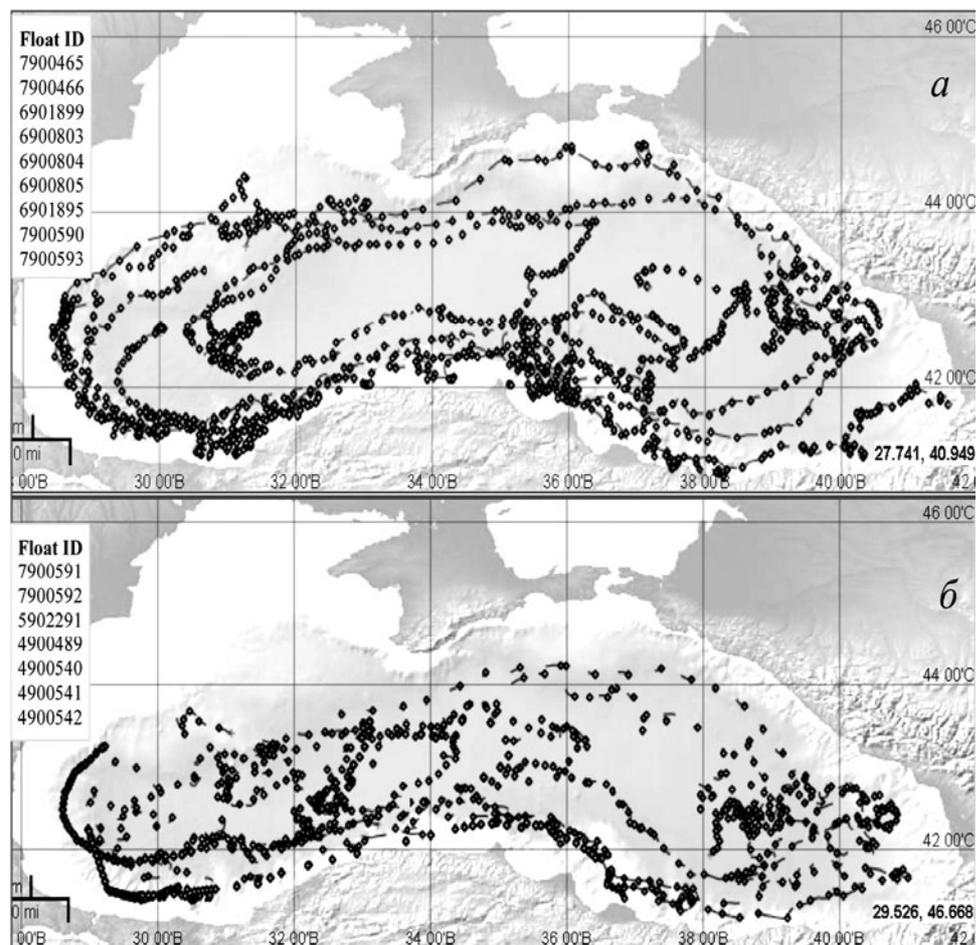


Рисунок 1.5 – Траектории буев ARGO: *a* – буев с парковочными глубинами 450, 500, 750 м; *б* – буев с парковочными глубинами 1000, 1300, 1500 м

Траектории не отображают в точности трехмерный дрейф поплавков, но могут обозначить области с особенностями глубинной циркуляции, например, районы с устойчивыми течениями или зоны вихревых образований. По данным позиционирования, в общей циркуляции отмечается циклоническая направленность, в северной половине моря скорости направлены главным образом на запад, а в южной – на восток. У западной части Анатолийского побережья наблюдается зона устойчивых циклонических глубоководных течений: все поплавки, попадавшие в разное время в этот район, имеют согласованные траектории вдоль свала глубин на восток. Прослеживается также попадание буев в отдельные мезомасштабные вихри, причем в центральной и западной частях моря эти вихри крупнее, чем в юго-восточной области [196]. В целом, траектории рассмотренных буев следуют расположению изобат, что согласуется с результатами работ [185, 198, 209].

В отличие от карт траекторий, построенное поле скорости течений (Рисунок 1.6) [128] позволяет не только отметить отдельные особенности глубоководной циркуляции, но и оценить их трехмерную структуру с учетом реального расположения векторов скорости в соответствующих слоях.

Наибольшее количество векторов приходится на западную и юго-западную части моря. Вдоль материкового склона по периферии бассейна проходит циклоническое течение, определяется зона западного циклонического круговорота. В районе устья р. Сакарья на горизонтах 350–600 м наблюдается мезомасштабный вихрь. Мезомасштабные вихри в слое 350–800 м проявляются также в районе устья р. Кызыл-Ирмак в восточной части Анатолийского побережья. Во всех рассмотренных слоях обнаруживаются вихри на свале глубин у южной границы северо-западного шельфа (СЗШ), в юго-восточной части моря и центре западной части бассейна [196]. Как будет показано далее, указанные особенности отмечаются и в результатах прогностических численных экспериментов, и в расчетных данных ретроспективного анализа.

Для статистического анализа направлений течений было проведено разделение всех рассчитанных векторов скорости зонально по 43°с.ш. и построены 8 диаграмм распределения направления скорости в 4 слоях – отдельно для северной

и южной частей моря (Рисунок А.1 Приложения А). Диаграммы показали постоянство направления переноса с запада на восток в южной части и с востока на запад – в северной части моря. При этом наиболее повторяющееся направление скорости варьирует в пределах $30\text{--}40^\circ$ [196].

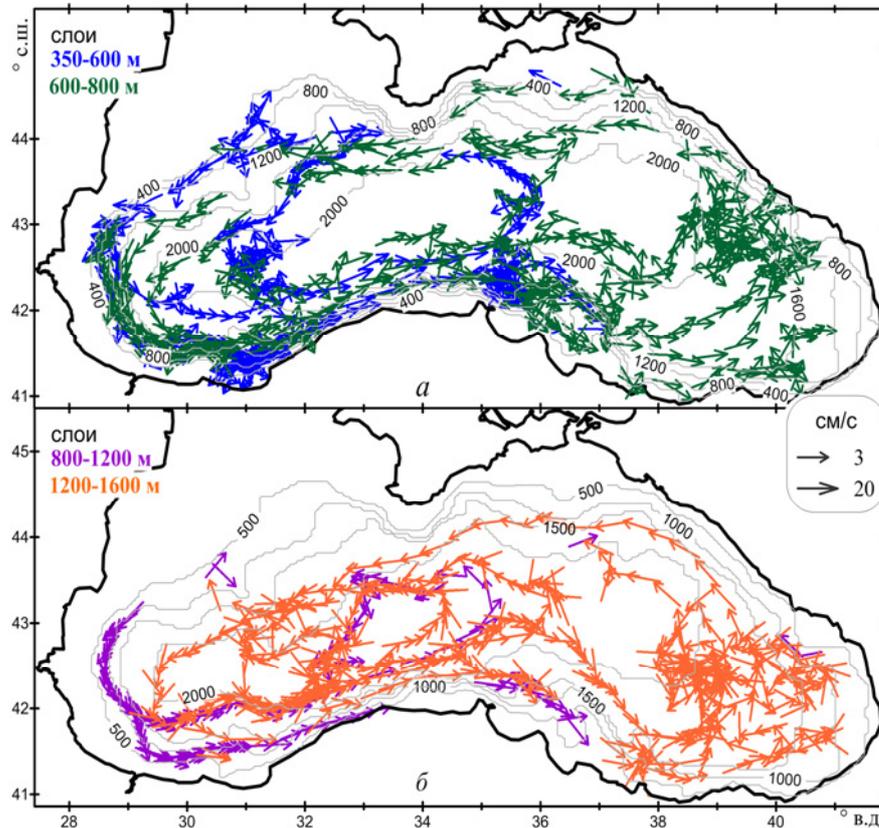


Рисунок 1.6 – Скорости течений: *а* – в слое 350–800 м (парковочные глубины 450, 500, 750 м); *б* – в слое 800–1600 м (парковочные глубины 1000, 1300, 1500 м). Серые линии – изобаты (глубина в метрах)

В Таблице 1.1 приведена рассчитанная по данным ARGO средняя скорость течений в рассматриваемых слоях с учетом 95%-ного доверительного интервала. Она составляет от 3,2 до 6,3 см/с, причем интенсивность течений возрастает в окрестностях горизонта 1000 м. Однако, возможно, это связано с тем, что данный слой оказался менее всего обеспеченным данными измерений и преобладающее количество данных на этой глубине было получено в зимний сезон с января по март, в то время как для остальных рассматриваемых слоев данные измерений были распределены в течение года более равномерно (Рисунок 1.7) [128]. Поэтому

для подтверждения или опровержения факта усиления скорости в окрестностях горизонта 1000 м необходимы дополнительные данные наблюдений на этих глубинах.

Таблица 1.1 – Количество рассчитанных векторов и значения средней скорости

Слой: глубина, м	Кол-во векторов	Средняя скорость, см/с	95%-ный доверительный интервал, см/с	Процент значений скорости выше 5 см/с (10 см/с)
350 – 600	269	3,6	$\pm 0,4$	31 (13)
600 – 800	496	4,0	$\pm 0,2$	24 (2)
800 – 1200	132	5,7	$\pm 0,6$	45 (11)
1200 – 1600	474	3,5	$\pm 0,2$	20 (1)

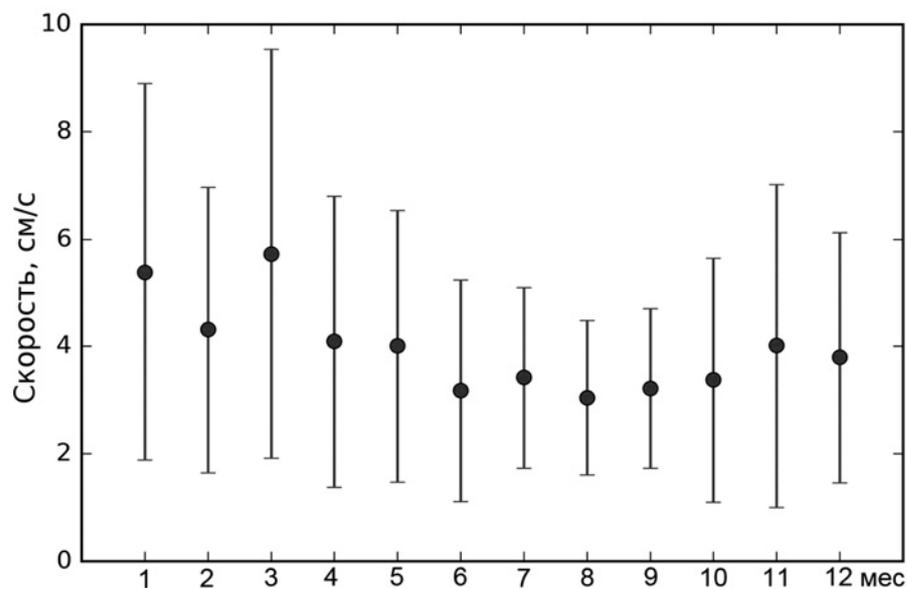


Рисунок 1.7 – Среднемесячные значения (обозначены точками) всех построенных векторов скоростей течений. Вертикальные отрезки показывают величину СКО

Количество векторов скоростей течений, превышающих по модулю 5 см/с, составляет 30 % от всех рассчитанных для слоя 350–600 м, 45 % – для слоя 800–1200 м и 20–24 % в других слоях. В слоях 350–600 м и 800–1200 м более 10 % модулей скоростей оказалось выше 10 см/с. Около 1 % всех рассчитанных значений скорости превышает 25 см/с. Максимальные значения отдельных векторов скоро-

сти отмечаются в верхнем из рассмотренных слоев (350–600 м). Годовой ход средних по всей выборке скоростей течений и среднеквадратические отклонения для каждого месяца показаны на Рисунке 1.7. Установлено, что в январе–марте скорости глубоководных течений выше в среднем на 10–20%, а самые низкие значения отмечаются с июня по октябрь.

1.3.4 Погрешности метода. Работы по вычислению средних скоростей течений в Черном море с помощью буев ARGO на современном этапе носят скорее оценочный характер. Основная причина всех неточностей – отсутствие данных о траекториях и времени нахождения поплавков непосредственно на горизонте дрейфа – обусловлена технической невозможностью позиционирования этих буев непосредственно под водой.

В используемом подходе расчета скорости – по координатам обнаружения поплавков на поверхности – к рассмотрению не принимаются различного рода погрешности [209, 180, 128]. К причинам, затрудняющим определение средней скорости буя на глубине дрейфа, следует отнести: неточное определение координат на поверхности при всплытии и погружении (наиболее актуально для поплавков, не оснащенных GPS-датчиком и позиционировавшихся спутниковой системой *Argos*), вертикальный сдвиг скорости течений при подъеме и опускании поплавка на парковочную глубину, инертность буя при изменении направления и скорости течения, парусность и стоксов дрейф на поверхности океана [181].

Поскольку на современном этапе развития системы ARGO позиционирование вновь размещающихся в Черном море буев поддерживается преимущественно спутниковой телекоммуникационной системой *Iridium* с использованием GPS, то значимость результатов, полученных при помощи ранее размещенных и уже отработавших поплавков без GPS-датчиков постепенно сокращается. В то же время, снос буя при его всплытии на поверхность для передачи данных через спутник и обратном его погружении остается наиболее весомым из факторов, привносящих ошибки в вычисления. В случае сильных течений в верхних слоях расчет скорости поплавка на его парковочной глубине по позиционированию на поверхности становится весьма приблизительным. Вклад вертикального сдвига скорости при

этом составляет по различным оценкам до 20 % от рассчитанной величины скорости, учитывая значительную разницу скоростей течений вблизи поверхности и на парковочном горизонте [196].

Информация о пути, в действительности пройденном буюм на глубине, может быть откорректирована, например, с учетом глубины профилирования и средней скорости подъема (~ 10 см/с), с использованием результатов численного моделирования и/или по данным о климатических течениях в конкретном районе моря. Успешный опыт корректировки результатов расчета скорости поплавков для отдельных районов Мирового океана уже существует [190, 209]. Однако для Черного моря такая задача пока не решена. Проведенные предварительные исследования по сопоставлению модельных скоростей течений и траекторий поплавков ARGO в Черном море для горизонта 200 м [143] пока не дали обнадеживающего результата. В перспективе, работы по учету возможных погрешностей при определении пути, пройденного поплавком непосредственно под водой, должны способствовать уточнению скорости течений на соответствующих глубинах.

Несмотря на указанные погрешности вычислений, в данной работе для нахождения скоростей течений был рассмотрен наиболее полный массив данных измерений ARGO в Черном море. Оказалось возможным скомпоновать данные по слоям, включающим парковочные глубины буюев, и показать среднюю скорость и направление переноса. Показано, что примерно 88% абсолютных величин вычисленных скоростей находятся в диапазоне 1–20 см/с. Средняя за все время измерений скорость течений составила в слоях 350–600 и 600–800 м – около 4 см/с, в слое 800–1200 м – около 6 см/с, в слое 1200–1600 м – 3,5 см/с. Значительное количество рассчитанных векторов скорости имеют величину более 5 см/с (30% в слое 350–600 м, 45 % – в слое 800–1200 м и более 20 % в других слоях) [196].

Показано, что течения наиболее стабильны в области свала глубин, а вихревые образования чаще всего встречаются в районах со сложной орографией и в абиссальной области моря. По картам траекторий и векторов скорости течений можно отследить наличие мезомасштабных вихрей разных знаков завихренности, в которые вовлекаются буи во всех рассмотренных слоях. Некоторые из таких

вихрей могут быть ассоциированы с известными особенностями поверхностной циркуляции (Батумский антициклон, восточный и западный циклонические круговороты, Севастопольский антициклон, Кызыл-Ирмакский вихрь и т. п.) или особенностями рельефа дна [196].

Что касается наличия противотечений в глубинных слоях, то покрытие акватории Черного моря станциями ARGO пока не дает полной картины глубоководной циркуляции, и построенные по имеющимся данным траектории и рассчитанные векторы скорости позволяют говорить только об общем циклоническом направлении бассейнового переноса, дрейфе буев вдоль изобат и наличии в глубинных слоях вихревых структур разных знаков завихренности [196]. Увеличение количества станций, совершенствование имеющейся методики расчета и устранение погрешностей при определении пути поправка непосредственно на горизонте дрейфа будут способствовать дальнейшей детализации структуры глубоководных течений.

1.3.5 Течения антициклонической направленности по данным буя ARGO № 6901833. Анализ данных буев с меньшими парковочными глубинами, не вошедших в рассмотренную выше выборку для оценки глубоководных течений, позволил выявить особенности поля скоростей в пределах основного пикноклина вблизи северокавказского побережья. Так, в пользу наличия непостоянных течений антициклонической направленности в этом районе свидетельствуют данные наблюдений буя ARGO № 6901833 (Рисунок 1.8). Рисунок выполнен с помощью сервиса сайта [159].

Глубина дрейфа буя № 6901833 составляет всего 200 м, т.е основную часть времени он проводит именно в нижней части пикноклина, периодически заглубляясь и выполняя вертикальное профилирование с горизонтов 750 или 1500 м к поверхности моря. Данные полученных профилей показывают, что измерения на соответствующих станциях проводились корректно, хотя буй не всегда достигал заданной глубины профилирования вследствие сложного рельефа дна.

Траектории буя между станциями № 20 и № 28, выполненными им в период с 6 сентября по 15 октября 2016 г. (40 суток) и между станциями № 50 и № 52 в

период с 3 февраля по 13 февраля 2017 г. (10 суток) демонстрируют перенос буя в юго-восточном направлении, противоположно вышележащему ОЧТ. Средние скорости движения буя в эти периоды составили: осенью – 6,5 см/с (станции №№ 20–28) и зимой – 25 см/с (станции №№ 50–52).

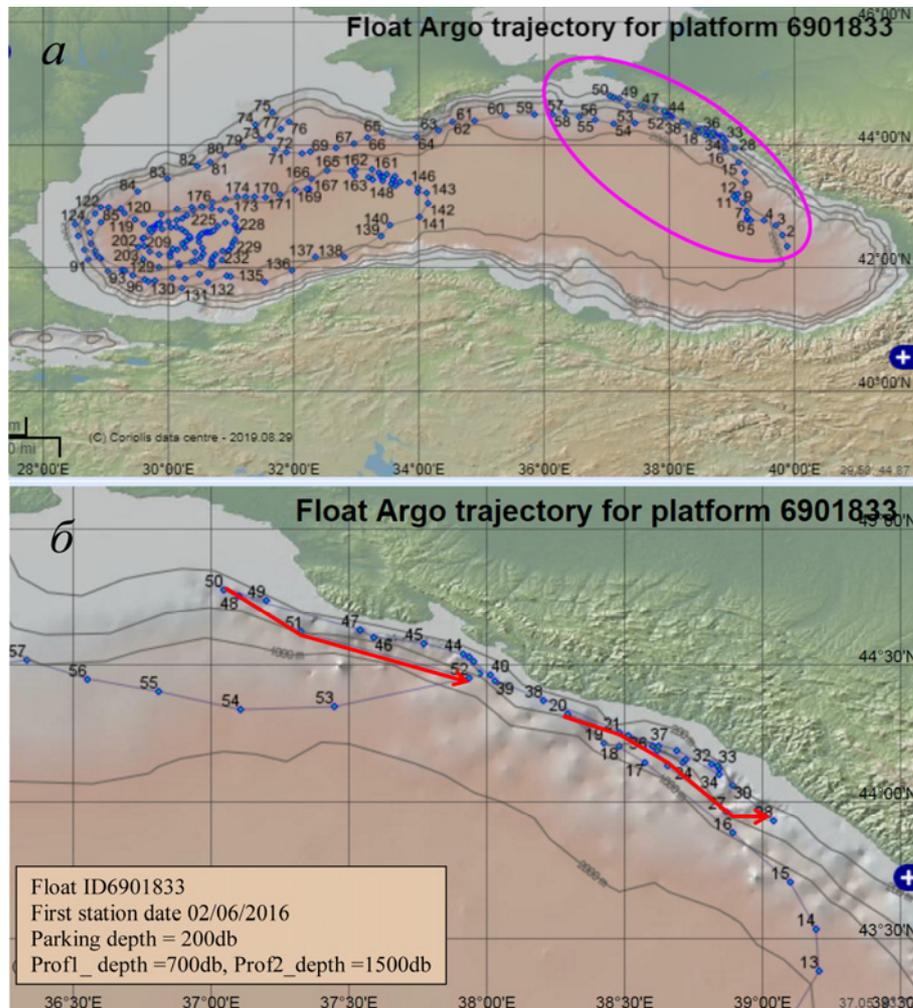


Рисунок 1.8 – Траектории буя ARGO № 6901833: *а* – за все время работы (с 02.06.2016), обведена область АЦТ; *б* – район АЦТ, в которые попадал буй, стрелками отмечены перемещения буя в юго-восточном направлении

Существует мнение, что активный режим судоходства в рассматриваемом районе может препятствовать нормальной работе буюв, и в ряде случаев это действительно так. Однако, что касается приведенного примера, значительная продолжительность движения буя № 6901833 на юго-восток (40 и 10 суток) не согласуется с указанными предположениями. Кроме того, данные

профилирования на всех указанных станциях показывают, что буй отрабатывал их корректно, что было бы затруднительно при его принудительном перемещении. Поэтому данные поплавок ARGO № 6901833 принимаются в качестве свидетельства наличия в пикноклине юго-восточных АЦТ продолжительностью порядка от нескольких суток до нескольких недель. Далее для района северокавказского побережья анализируются и другие данные натуральных наблюдений (на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик»).

1.4 Скорости глубоководных течений по данным измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик»

1.4.1 Используемые данные наблюдений на полигоне. Из расчетов на основе данных глубоководных судовых STD-измерений с борта НИС «Акванавт», совершавшего регулярные исследовательские рейсы с базы Южного отделения ИО РАН в Геленджике (Черноморский полигон ИО РАН «Геленджик» [74]), можно получить информацию о течениях в северо-восточной части Черного моря [51]. В данном подразделе, в частности, приводятся такие результаты, полученные с применением динамического метода.

Кроме того, детальные сведения о вертикальном распределении течений в районе Геленджика были получены с помощью глубоководных измерений профиля скорости течений в ходе натурального эксперимента с использованием зондирующего комплекса «Аквалог» (17–19 июня 2011 г.) [138]. Описание и результаты измерений течений [138], приводимые здесь для сопоставления с другими данными натуральных наблюдений, будут также использоваться в Разделе 3 для сравнения с результатами моделирования.

1.4.2 Расчет скоростей течений на основе STD-данных. Были обработаны данные о температуре и солёности, полученные в период 1997–2008 гг. в ходе глубоководных STD-наблюдений на полигоне ИО РАН в Геленджике (рейсы НИС «Акванавт»). Основной тип трасс при проведении указанных наблюдений – разрез, протяженность которого достигала 100 миль, расстояние между станциями

составляло около 7–8 миль. Типичная трасса такого разреза показана на Рисунке 1.9 звездочками, рисунок продублирован из работы [74, рис. 10, с. 25], авторская подпись сохранена. Для анализа были отобраны данные глубоководных разрезов, максимальная глубина измерений составляла 500 м [51].

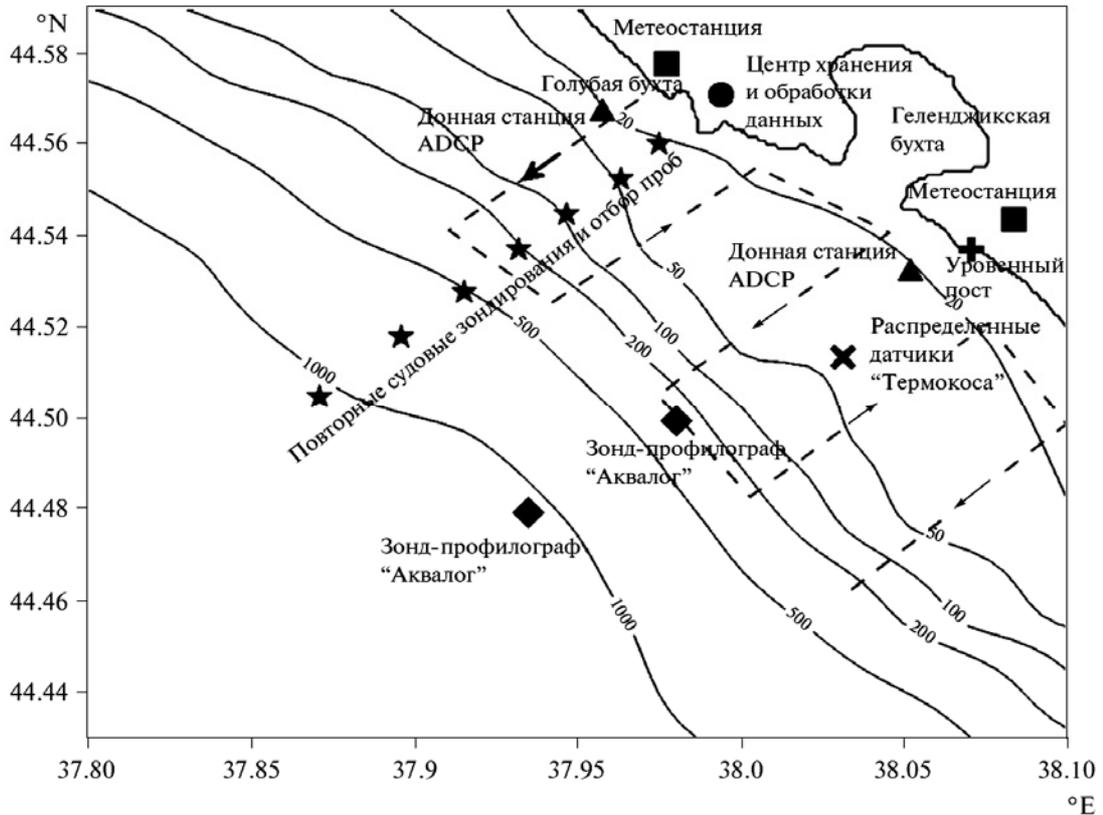


Рисунок 1.9 – Схема экспериментального подспутникового гидрофизического полигона. Звездочками обозначены станции судовых мониторинговых наблюдений, включающих STD зондирования. Штриховой линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения, с помощью буксируемого за судном ADCP [74, рис. 10, с. 25]

Данные судовых измерений температуры и солености использовались для расчета геострофических течений динамическим методом [51, 155]. Этот метод является приближенным, но благодаря своей относительной простоте нашел широкое применение в решении практических задач. Его использование на текущем этапе исследования объясняется необходимостью оценки скорости течений на основе максимального объема данных натурных наблюдений без привлечения ме-

тодов численного моделирования (для дальнейшего сопоставления с модельными результатами).

В ходе обработки данных натурных съемок на рассматриваемых станциях рассчитывались профили плотности ρ до глубины «нулевого горизонта», за которой принималась максимальная глубина выполнявшихся измерений $z_0=500$ м. Рассчитанные профили интерполировались на сетку с равномерным шагом, и проводилось построение интегралов плотности. Профиль вдольбереговой компоненты скорости между соседними станциями (назовем их 1 и 2) в направлении, перпендикулярном трассе разреза, вычислялся по формуле

$$V_{n\perp}(\bar{r}_2 - \bar{r}_1, z) = (g / f\rho_0) \cdot \left(\int_{z_0}^z \rho(x_2, y_2, z) dz - \int_{z_0}^z \rho(x_1, y_1, z) dz \right) / |\bar{r}_2 - \bar{r}_1|, \quad (1.1)$$

где g – ускорение свободного падения;

f – параметр Кориолиса;

ρ_0 – средняя плотность морской воды;

$\square r_1, \square r_2$ – расстояние от береговой линии до соседних станций;

z – глубина.

В некоторых полученных полях были отмечены глубоководные течения, направленные на юго-восток (в антициклоническом направлении). Эти съемки относились к летнему сезону – началу июля 1998 г. и концу июня 2004 г. Соответствующие карты вдольбереговой компоненты скорости течений, перпендикулярной трассе разреза, показаны на Рисунке 1.10. Из рисунка видно, что в указанные периоды на глубинах 200–300 м четко выделяются юго-восточные течения со скоростями до 4 см/с [51].

Протяженность обнаруженных течений на нижней границе основного пикноклина составляет 10–12 км по ширине и 200–300 м по глубине. Продолжительность существования указанных течений во времени установить по имеющимся данным в силу их дискретности не представляется возможным. Однако наличие узких нестационарных течений антициклонической направленности под основ-

ным пикноклином можно предположить и в другие, не обеспеченные измерениями, периоды.

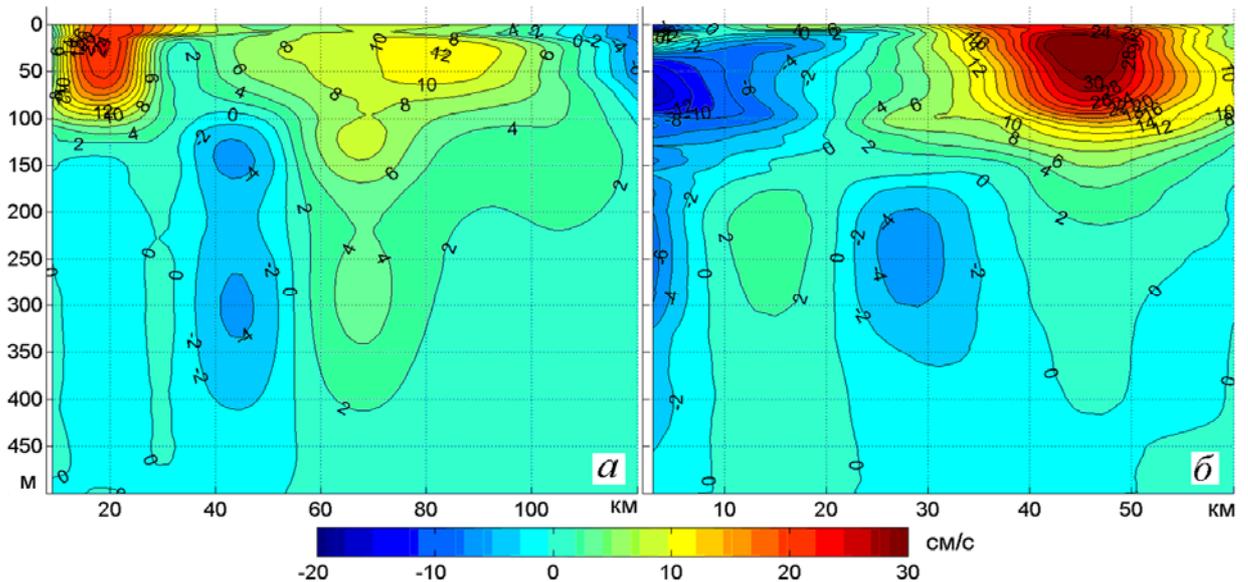


Рисунок 1.10 – Вдольбереговая компонента скорости течений: *а* – 2–3 июля 1998 г.; *б* – 24 июня 2004 г. На горизонтальной шкале показано расстояние от берега; красный цвет соответствует направлению на СЗ, синий – на ЮВ

1.4.3 Данные зондирующего комплекса «Аквалог». На полигоне ИО РАН «Геленджик» А.Г. Островским, А.Г. Зацепиным и соавторами был подготовлен и 17–19 июня 2011 г. проведен натурный эксперимент по измерению профилей скорости течений и других параметров морской среды с использованием заякоренного зондирующего комплекса «Аквалог» [138]. Измерения проводились в глубоководной части свала глубин в точке ($44^{\circ}28'17''$ с.ш., $37^{\circ}56'14''$ в.д.), максимальная глубина измерений составляла 1020 м. В данном подразделе приводятся, согласно публикации [138], важные для исследования глубоководных течений результаты этой работы, поскольку за время проведения наблюдений вертикальные профили скорости измерялись установленным на «Аквалог» ADCP многократно. В Разделе 3 данные измерений сопоставляются с результатами численного моделирования.

В ходе измерений были получены профили меридиональной и зональной составляющих скорости течений от приповерхностного слоя до придонного. Ил-

люстрация результатов обработки профилей из работы [138] приведена на Рисунке 1.11. Зондирование с помощью «Аквалога» проводилось с дискретностью 1 м по вертикали, за время эксперимента было выполнено 14 циклов спуск/подъем. Авторами было зафиксировано юго-восточное течение (антициклонической направленности) на глубинах 500–950 м, ядро которого (со скоростями около 3 см/с) залегало в слое 700–850 м. Согласно полученным данным, в верхнем 100-метровом слое преобладал северо-западный перенос, соответствующий ОЧТ, на горизонтах 100–150 м происходило резкое снижение скорости, а на глубинах 200–400 м течения практически отсутствовали ([138, с. 9]).

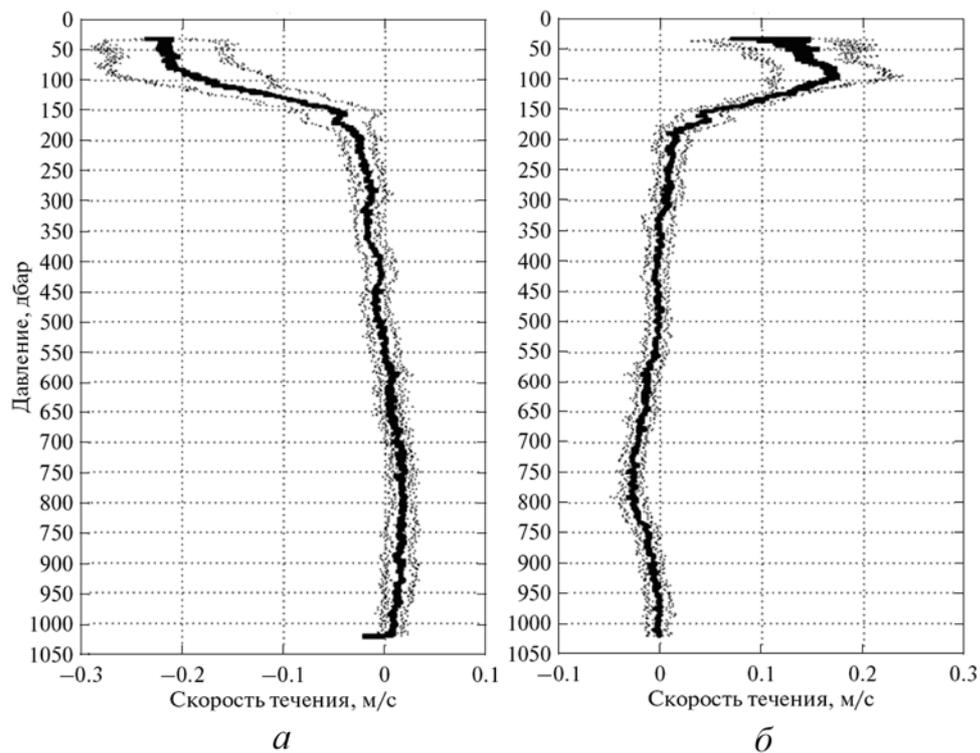


Рисунок 1.11 – Вертикальные тонкоструктурные профили зонального (*a*) и меридионального (*б*) компонентов скорости течений по данным глубоководных измерений с помощью профилографа «Аквалог» 17–19.06.2011 г. в северо-восточной части Черного моря. Сплошные линии – профили средних значений, пунктирные линии – среднеквадратические отклонения [138, с. 9, рис. 5]

В сравнении с представленными выше результатами расчетов скоростей течений на основе STD-измерений, по данным «Аквалога» ядро течения антици-

клонической направленности залегало глубже, а на глубинах 250–300 м (где по STD–данным в летние периоды обнаруживались АЦТ) скорости во время наблюдений были близки к нулю. Однако нужно отметить, что на полигоне «Геленджик» синхронных с зондированием «Аквалогом» судовых глубоководных съемок не проводилось, а эксперимент по глубоководному зондированию с помощью «Аквалога» пока не повторялся. Выявленные особенности вертикальной структуры течений в районе полигона, а также результаты обработки других данных наблюдений будем сопоставлять далее с результатами численного моделирования.

Выводы к Разделу 1

Анализ данных измерений скорости из БОД МГИ, выполненных в разных рейсах и разными типами приборов на горизонтах 500, 700 и 1000 м, в том числе на многосуточных станциях, показал, что направление глубоководных течений может не совпадать с направлением поверхностной циркуляции, при этом изменение направления с глубиной может быть весьма значительным. В то время, на одних станциях направление течений было практически постоянным по глубине, на других станциях оно менялось на противоположное. На ряде станций установлено возрастание значения средней скорости как по всей глубине, так и на отдельных глубоководных горизонтах.

Вместе с тем, даже при обнаружении смены направления скорости с глубиной на отдельных станциях, уверенно определить присутствие глубинных противотечений на основе только имеющихся в БОД МГИ данных измерений не представляется возможным из-за их малочисленности и нерегулярности. Изменение направления течения может быть объяснено, например, попаданием прибора-измерителя в зону действия глубокого вихря. Так, если вихрь имеет наклонную ось, то измеренные скорости на разных глубинах могут относиться с разным его частям и быть противоположно направленными. В отсутствие регулярных съемок и необходимого количества достоверных данных говорить о наличии противоте-

чения бассейнового масштаба только на основе имеющихся архивных измерений скорости затруднительно.

На основе статистической обработки имеющихся данных измерений скорости из БОД МГИ были определены медианы и средние скорости течений на глубоководных горизонтах. Значение медианы оказалось более информативным, поскольку на некоторых станциях количество измерений с низкой амплитудой (меньше порога чувствительности прибора) было существенным и составило более четверти всех данных. На глубине 500 м на 11 станциях из 22 (50 %) медиана скорости превышала 5 см/с, а на 4 из них была выше 10 см/с. На горизонте 750 м на 5 станциях из 11 (45 %) медиана скорости была более 5 см/с, на 1 из станций составила 12 см/с. На глубине 1000 м на 5 станциях из 12 (42 %) скорость была выше 5 см/с, и на 2 станциях была равна 12 см/с. Таким образом, значительного снижения скорости от горизонтов 500 до 1000 м на основе данной выборки не установлено.

Рассмотрение данных регулярных станций, выполненных за 10-летний период автономными буями-профилемерами ARGO, показало, что общее направление движения буев в глубинных слоях соответствует циклоническому характеру бассейновой циркуляции. Буи дрейфуют преимущественно вдоль изобат, их траектории свидетельствуют о существовании глубоководных мезомасштабных вихрей разных знаков завихренности и струйных течений. Некоторые из вихрей могут быть ассоциированы с известными особенностями поверхностной циркуляции (Батумский антициклон, восточный и западный циклонические круговороты, Севастопольский антициклон, Кызыл-Ирмакский вихрь и т.п.) или особенностями рельефа дна. Показано, что глубоководные течения распространяются вдоль материкового склона и наиболее интенсивны у западной части Анатолийского побережья, где их скорости местами достигают 15–20 см/с. В глубоководной части и в районах со сложной орографией чаще всего встречаются вихревые структуры.

По данным автономных всплывающих буев-профилемеров ARGO рассчитаны векторы их средних скоростей и построены карты глубоководных течений в четырех слоях, соответствующих значениям парковочных горизонтов буев. Сред-

ние скорости глубоководных течений составляют 3–4 см/с, усиливаясь в слое 800–1200 м до 6 см/с. Наибольшие скорости отмечаются в январе-марте, а самые низкие значения наблюдаются в июне-октябре. Примерно 88% абсолютных величин вычисленных скоростей течений 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.

Расчет средних скоростей на основе данных глубоководных буев ARGO не показал наличия течений антициклонической направленности на глубинах 350–1600 м. Однако присутствие непостоянных юго-восточных АЦТ определяется вдоль северо-восточного свала глубин по данным буя ARGO № 6901833 с парковочной глубиной 200 м, а также контактных измерений на полигоне ИО РАН «Геленджик». Скорости таких течений в летний период по данным наблюдений на полигоне – до 4 см/с, ширина – до 10–12 км. Скорость перемещения буя ARGO № 6901833 на глубине 200 м в юго-восточном направлении была несколько выше – 6,5 см осенью (в сентябре–октябре 2016 г.) и 25 см/с – зимой (в феврале 2017 г.). По данным наблюдений АЦТ обнаруживаются на глубинах 200–300 м летом – при расчетах течений динамическим методом на ряде нормальных к берегу разрезов и на глубинах 500–950 м – при прямых измерениях скорости течений зондирующим комплексом «Аквалог» в июне 2011 г.

Основные результаты Раздела 1 опубликованы в статьях [51, 128, 169, 182, 196], тезисах и материалах конференций [3, 4, 25, 101, 194, 114, 116, 117].

РАЗДЕЛ 2 ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

2.1 Об исследованиях климатических течений Черного моря

Освоение ресурсов Черного моря и прибрежных его территорий требует актуальной информации об основных динамических параметрах морской среды. Данные о годовом ходе гидрофизических полей важны не только для изучения климата моря, но и могут быть положены в основу решения целого ряда прикладных, в том числе экологических задач. Зачастую наряду со знанием текущих значений температуры, солености, уровня моря, течений и других гидрофизических характеристик необходима информация об их климатическом распределении [32, 84, 91, 130]. При этом важными свойствами требуемых полей являются их непрерывность (в смысле регулярности и отсутствия пропусков в данных) и высокое разрешение по времени и пространству.

Используя для построения таких массивов только данные натурных наблюдений, без дополнительного привлечения трехмерных моделей динамики моря, невозможно детально описать эволюцию основных гидрофизических полей. Восстановленные исключительно на основе данных измерений климатические поля температуры и солености не дают детального представления об их структуре и изменчивости во всем объеме Черного моря, и особенно в глубинных его слоях [167]. А построение трехмерного поля течений только на основе измерений скорости и в настоящее время, и в обозримой перспективе неосуществимо из-за дефицита соответствующих натурных наблюдений. Особенно ощутима нехватка измерений на больших глубинах в силу относительно небольшого числа данных наблюдений течений, накопленных за всю историю глубоководных исследований.

Эффективным методом получения климатических массивов данных на современном этапе является численное моделирование. Оно позволяет рассчитать и проанализировать внутригодовую изменчивость гидрофизических полей и использовать результаты расчетов для последующего развития и калибровки ком-

плексных (физико-химических, физико-биологических и пр.) моделей, где также важны непрерывность и хорошее пространственно-временное разрешение данных. При этом результаты натурных измерений могут включаться в модель («усваиваться», «ассимилироваться»), приводя в соответствие расчетные и наблюдаемые параметры.

Практически все варианты моделей динамики Черного моря проходили этапы верификации с помощью расчетов климата, где в результате численного моделирования восстанавливается годовой ход основных гидрофизических параметров. Такое тестирование предполагает в итоге достижение адекватного воспроизведения моделью общей схемы черноморской циркуляции и сезонной эволюции гидрофизических полей. В результатах расчета должны воспроизводиться основные характерные черты термохалинной и динамической структуры вод Черного моря: ОЧТ, суббассейновые циклонические круговороты в восточной и западной частях моря, квазистационарные антициклонические вихри, ХПС и т.д. Все эти особенности относятся к уже относительно хорошо изученному верхнему слою моря (от поверхности до глубин 200–300 м). При использовании численных моделей в рамках региональных исследований дополнительное внимание уделяется воспроизведению локальных особенностей получаемых полей. Что же касается глубоководной циркуляции, то в работах по моделированию она чаще всего обрисовывается лишь в общих чертах, либо этот вопрос не затрагивается вовсе. Как правило, предполагается, что глубоководная циркуляция циклоническая, а значения горизонтальных скоростей в нижних слоях должны воспроизводиться низкими, порядка первых сантиметров в секунду.

Большое количество работ по моделированию климата моря относится к периоду 1990–2000-х годов, именно в это время благодаря быстрому прогрессу в вычислительной технике модели динамики океана получили новые возможности для развития. Их дальнейшее усовершенствование привело к улучшению пространственно-временного разрешения получаемых массивов гидрофизических полей и более достоверному воспроизведению их изменчивости. Для бассейна Черного моря расчеты климатических полей выполнялись во многих работах и

отечественными, и зарубежными авторами [2, 5, 50, 75, 79, 80, 85, 102, 151, 163, 183, 210, 214, 220]. Для этого использовались различные численные модели: к примеру, в [80] исследования были проведены на основе адаптированной для Черного моря модели POM [93, 162], в работе [210] численные эксперименты выполнялись на основе варианта модели GETM [163], в [2] – на основе Бергенской модели [161] и т.д.

Поскольку расчеты климата моря чаще проводятся именно для верификации численной модели, подробному анализу особенностей модельных полей в глубинных слоях редко уделяется особое внимание. В начале 2000-х в процессе разработки и развития модели МГИ динамики Черного моря такой вопрос рассматривался [43, 46, 50, 81]. Однако горизонтальное разрешение модели, составлявшее в этих работах 14,8 км, было достаточно грубым [24] для воспроизведения особенностей динамики черноморских вод не только в прибрежных шельфовых районах, где первый бароклинный радиус деформации Россби R_d составляет 5–10 км, но и для глубоководной области моря, где оценки R_d варьируют от 15–18 км в недавней публикации [24] до 20–25 км в [10] и 25–30 км в [215].

В представленной работе климатические поля рассчитываются на сетке с разрешением 5 км по горизонтали, что позволяет более корректно описать динамическую структуру вод Черного моря. Улучшение горизонтального разрешения приводит к воспроизведению глубоководных течений разной направленности, в то время, как при моделировании на грубых сетках подобные эффекты могут теряться.

Используемая для расчета климата моря конфигурация модели МГИ реализована с применением методики ассимиляции гидрологических климатических данных температуры и солености, которая впервые опубликована в работе [187]. С включением этой схемы ранее были выполнены также работы [5, 33, 43, 44, 46, 50, 81, 82] и расчеты с дополнительным усвоением в модели альтиметрических данных динамического уровня моря [60]. Необходимость ассимиляции данных наблюдений в моделях динамики океана обусловлена тем, что длительное интегрирование в ходе проведения численных экспериментов без привязки к натурным

данным может приводить к нереалистичному решению. По этой причине в модели стали включаться данные натурных измерений основных гидрофизических параметров. Сначала для этой цели использовались только гидрологические поля температуры и солености, а в дальнейшем – и спутниковые данные об уровне, температуре поверхности моря и др.

Основные этапы совершенствования методов расчета динамики моря с применением данных натурных измерений изложены в [80, 83]. В частности, в работе [83] указывается, что предложенная в 1965 г. А.С. Саркисяном идея использования наблюдаемых температуры и солености морской воды в моделях динамики океана впоследствии была успешно реализована в ряде диагностических, адаптационных и прогностических расчетов [50, 65, 71, 75, 79–82, 151, 166, 187]. Подчеркивается, что наиболее эффективным методом для восстановления климатической циркуляции является схема [187] с меняющимися в течение года граничными условиями и периодическим усвоением климатических гидрологических данных в численной модели. При таком подходе удается фильтровать большинство шумов, присутствующих в исходных гидрологических данных, а усваиваемые гидрологические поля, в свою очередь, способствуют компенсации погрешностей, возникающих из-за различного рода приближений и параметризаций в численной модели, не давая модельному решению отдаляться от реалистичного состояния. Методика ассимиляции данных наблюдений [187], развитая в работе [44] для схемы периодической ассимиляции, была использована в версии модели МГИ, применяемой для расчета климата моря в данной работе и представлена ниже.

2.2 Описание численной модели. Граничные и начальные условия

Расчет климатических гидрофизических полей Черного моря выполнялся с использованием численной нелинейной z -координатной модели МГИ динамики Черного моря [47, 48]. Эта модель стала основой для проведения расчетов в ряде национальных и международных проектов [86, 91, 170, 186, 188], где зарекомендовала себя как надежный инструмент для воспроизведения черноморской цирку-

ляции. Также модель была адаптирована для условий Мраморного моря [29, 49]. Она позволяет рассчитывать трехмерные по пространству поля температуры, солености, скорости, приведенный уровень моря, и другие, в том числе интегральные, характеристики морской среды. Система уравнений модели, граничные и начальные условия для расчета климата Черного моря приводятся ниже согласно работам [37, 48].

Уравнения модели записывается в прямоугольной декартовой системе координат в форме Громеко-Лэмба, используются приближения Буссинеска и гидростатики (ось x направлена на восток, ось y – на север, ось z – вертикально вниз)

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\zeta_x - \frac{1}{\rho_0}(P^1 + E)_x + (v_v u_z)_z - v_H \nabla^4 u, \quad (2.1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\zeta_y - \frac{1}{\rho_0}(P^1 + E)_y + (v_v v_z)_z - v_H \nabla^4 v, \quad (2.2)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (2.3)$$

$$\zeta_t + \int_0^H (u_x + v_y) dz = (Pr - Ev) / \rho_1, \quad (2.4)$$

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0\zeta + P^1, \quad (2.5)$$

где уравнение (2.4) получено в предположении выполнения линеаризованного кинематического условия для вертикальной скорости на поверхности моря

$$w = -\zeta_t + \frac{Ev - Pr}{\rho_1};$$

$$\xi = v_x - u_y \quad \text{– относительная завихренность};$$

$E = \rho_0 (u^2 + v^2) / 2$ – кинетическая энергия;

f – параметр Кориолиса;

g – ускорение свободного падения;

ζ – уровень моря;

ρ – плотность морской воды;

ρ_0 – средняя плотность морской воды;

$\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность пресной воды;

P – давление;

ν_V, ν_H – коэффициенты турбулентного обмена импульсом по вертикали и горизонтали соответственно;

Pr – плотность потока выпадения осадков;

Ev – плотность потока испарения воды с поверхности моря;

нижние индексы x, y, z, t обозначают дифференцирование по пространственным координатам и времени.

Плотность морской воды ρ рассчитывается на основе уравнения состояния (2.6), его коэффициенты брались согласно работе Мамаева [104]

$$\rho = \rho_0 + \alpha_1^T T + \alpha_1^S S + \alpha_2^T T^2 + \alpha^{ST} ST. \quad (2.6)$$

Уравнения адвекции–диффузии тепла и соли имеют следующий вид

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^T T)_z + \Lambda(T^{cl} - T), \quad (2.7)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^S S)_z + \Lambda(S^{cl} - S), \quad (2.8)$$

где T, S – температура и соленость морской воды;

κ^H – коэффициент горизонтальной диффузии;

κ^T, κ^S – коэффициенты диффузии тепла и соли по вертикали;

$\Lambda = [1/(Rel \cdot (1 + \eta^2(z)))] \cdot \delta(t - t^a)$, его структура аналогична работе [82]:

$\eta^2(z)$ – дисперсия ошибок измерений, нормированная на дисперсию поля;

t^a – момент усвоения данных наблюдений;

Rel – время релаксации (равное 1 суткам);

δ – управляющий параметр: $\delta = 0$ в период релаксации, $\delta = 1$ в момент ассимиляции данных наблюдений;

T^{cl}, S^{cl} – климатические температура и соленость, вычисленные по данным гидрологических наблюдений в работе [6] (далее в тексте эти поля будем обозначать префиксом «ГК» («гидрологический климат»), чтобы отличать их от модельных климатических полей температуры и солености).

Граничные условия. Морской бассейн аппроксимируется в модели боксами в виде прямоугольных параллелепипедов, поэтому граничные условия записываются следующим образом.

На поверхности при $z = 0$

$$\rho_0 \nu u_z = -\tau^x, \quad \rho_0 \nu v_z = -\tau^y, \quad C \kappa^T \rho_0 T_z = Q^T, \quad \kappa^y S_z = \frac{Ev - Pr}{\rho_1} S_0 + \gamma(S^{cl} - S_0), \quad (2.9)$$

где (τ^x, τ^y) – касательное напряжение трения ветра;

C – теплопроводность морской воды;

Q^T – плотность потока тепла из атмосферы;

S_0 – рассчитываемая в модели соленость на поверхности моря;

γ – заданный параметр релаксации, означающий скорость приспособления модельного поля к ГК. По результатам специализированных расчетов [82] значение параметра было выбрано равным 0,0011574 см/с (1 м в сутки).

Граничное условие для солености (4-е соотношение в (2.9)) дополнено вторым слагаемым в правой части по следующим соображениям. Проведенные специализированные эксперименты показали, что массивы данных об осадках и испарении содержат большие ошибки, и при интегрировании уравнений модели структура поля солености в верхнем слое моря становится нереалистичной. Во

избежание этого негативного влияния и было применено дополнительное усвоение ГК–солености на поверхности.

Граничные условия на дне: при $z = H(x, y)$

$$u = v = w = 0, \quad T_z = 0, \quad S_z = 0. \quad (2.10)$$

На твердых боковых стенках:

для меридиональных участков границы

$$u = 0, \quad v_x = 0, \quad \nabla^2 u = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \quad T_x = 0, \quad S_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0, \quad (2.11)$$

для зональных участков границы

$$v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 v = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \quad T_y = 0, \quad S_y = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (2.12)$$

На участках границы, где вода втекает, используются условия Дирихле:

для меридиональных участков

$$u = u^p, \quad \nabla^2 u = 0, \quad v_x = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \quad T = T^p, \quad S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0, \quad (2.13)$$

для зональных участков

$$v = v^p, \quad \nabla^2 v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \quad T = T^p, \quad S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (2.14)$$

Для верхнебосфорского течения и для Керченского пролива, когда течение направлено из Черного моря в Азовское

$$v = v^s, \quad \nabla^2 v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \quad T_x = 0, \quad S_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (2.15)$$

Начальные условия. В начальный момент времени $t = t^0$ задаются условия

$$u = v = 0, \quad \zeta = 0, \quad T = T^0(x, y, z), \quad S = S^0(x, y, z), \quad (2.16)$$

где T^0 , S^0 – ГК температура и соленость, соответствующие начальному моменту времени счета t^0 .

2.3 Параметры расчета климатических полей

Основные параметры, при которых был проведен численный эксперимент по расчету климатических полей Черного моря, таковы. По горизонтали разрешение составило 5×5 км, по вертикали счет проводился на 45 неравномерно расположенных z -уровнях (горизонтах) со значениями глубин: 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 62,5; 75; 87,5; 100; 112,5; 125; 150; 175; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300; 1400; 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2050; 2075; 2085; 2095 и 2100 м. Шаг по времени равен 5 мин [37, 53].

ГК значения температуры и солёности, усваиваемые в модели согласно уравнениям (2.7), (2.8), а также используемые в качестве начального распределения соответствующих полей в (2.16), были получены на основе статистически обработанных многолетних данных натуральных наблюдений в работе [6]. Эти данные были интерполированы на пространственную сетку модели, по ним были рассчитаны коэффициенты Фурье и восстановлены поля температуры и солёности на каждые сутки года. Согласно алгоритму, предложенному в [44], ГК температура и солёность усваивались в модели периодически (через каждые 3 ч). Ежесуточные поля температуры и солёности линейно интерполировались по времени в моменты ассимиляции [37, 167].

Для задания граничных условий на поверхности моря (годового хода атмосферных полей) использовались данные из следующих работ. Потоки тепла и влаги на поверхности моря были рассчитаны на каждые сутки года по данным [216] и [66] соответственно. Поля касательного напряжения трения ветра, восстановленные по распределениям приземного давления за 10-летний период, были взяты из работы [60]. Справочно-монографическое пособие [22] серии «Моря СССР» послужило источником данных о параметрах рек и проливов. Рельеф дна взят из Банка океанографических данных МГИ [160].

По горизонтали для турбулентной вязкости и диффузии использовалось би-гармоническое представление. Значения коэффициентов обмена импульсом и диффузии по горизонтали равны 10^{17} см⁴/с. Коэффициенты турбулентного обмена

на импульсом и турбулентной диффузии тепла и соли по вертикали рассчитывались в соответствии с аппроксимацией Пакановски–Филандера [33, 37, 208]

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0(1 + Ri)^{-2} + \nu_1^V, \\ \kappa^S &= [(\nu_0(1 + Ri)^{-2} + \nu_1^V)(1 + Ri)^{-1} + \kappa_1^S], \\ \kappa^T &= [(\nu_0(1 + Ri)^{-2} + \nu_1^V)(1 + Ri)^{-1} + \kappa_1^T] \end{aligned} \quad (2.17)$$

где $Ri = (g / \rho_0) \partial \rho / (\partial z [(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2])$ – число Ричардсона;

$\nu_0, \nu_1, \nu_1^V, \kappa_1^S, \kappa_1^T$ – известные постоянные.

Запись полученных полей производилась каждые расчетные сутки для всех основных параметров. Время интегрирования уравнений модели определялось в соответствии с поведением интегральных характеристик, выходом на квазипериодический режим плотности кинетической энергии на отдельных горизонтах и в целом по объему. Время достижения квазипериодического режима было максимальным на нижних горизонтах и составило приблизительно 1000 суток (Рисунок 2.1). Общее время счета составило более 20 лет.

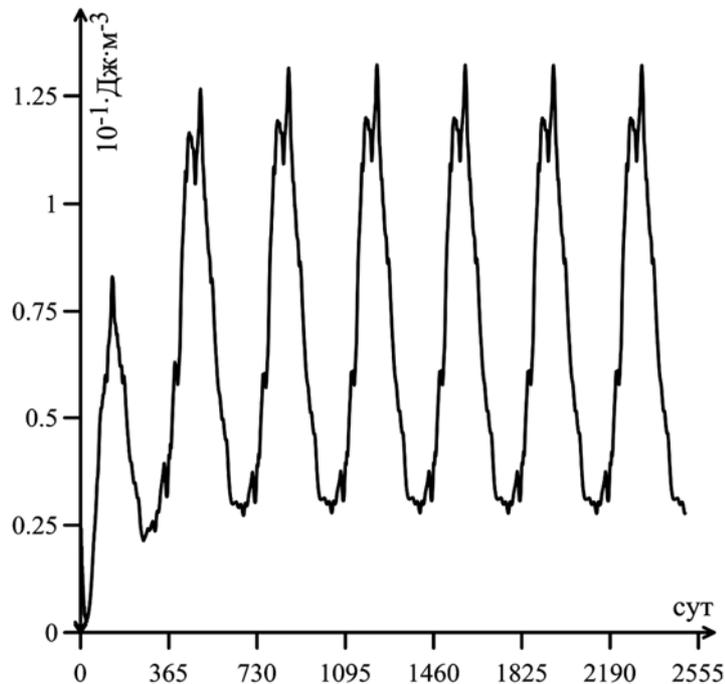


Рисунок 2.1 – Плотность средней кинетической энергии на горизонте 2100 м

2.4 Анализ модельного климата Черного моря

2.4.1 Воспроизведение моделью известных особенностей термохалинной и динамической структур вод Черного моря в верхнем слое. На сегодняшний день существуют довольно четкие представления об общей структуре поверхностной циркуляции вод Черного моря. Примеры построенных схем течений из публикаций [90, 150, 185, 205] приведены на Рисунке 2.2.

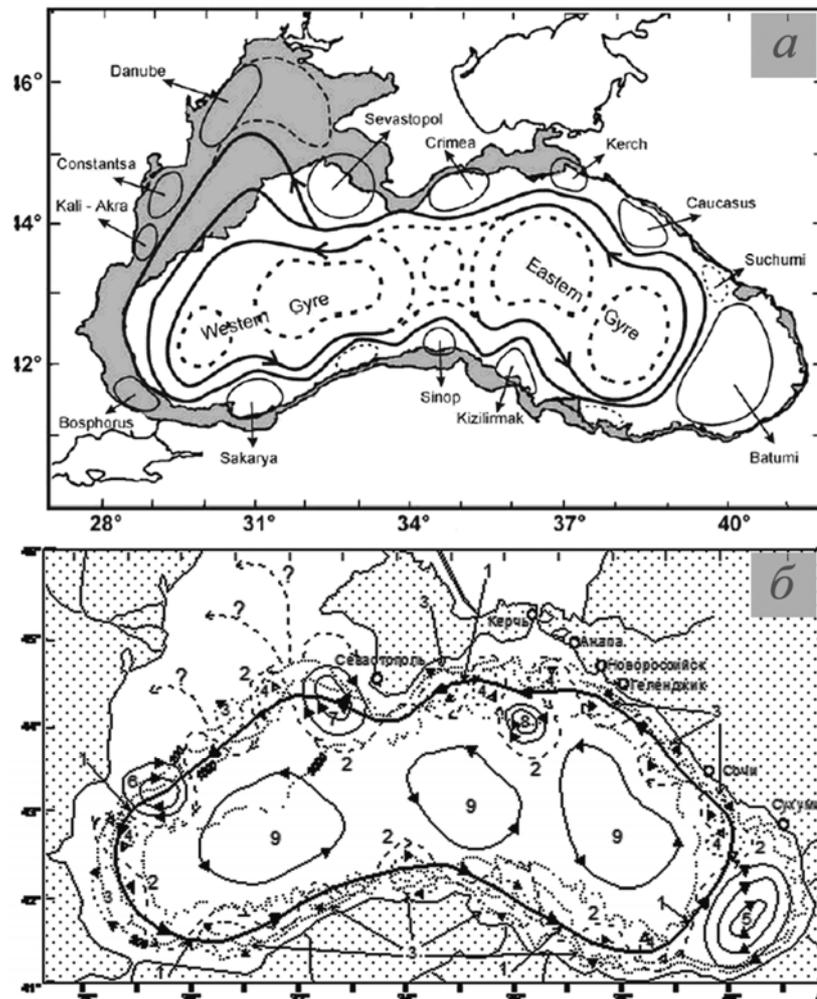


Рисунок 2.2 – Схемы поверхностной циркуляции вод Черного моря из работ [185; 205] (а) и [90, 150] (б). Цифрами на нижнем рисунке обозначены: 1 – кольцевое циклоническое течение (КЦТ), среднее положение стрежня; 2 – меандры КЦТ; 3 – прибрежные антициклонические вихри (ПАВ); 4 – циклонические вихри; 5 – Батумский антициклонический вихрь; 6 – Калиакрский ПАВ; 7 – Севастопольский ПАВ; 8 – Керченский ПАВ; 9 – квазистационарные циклонические круговороты

Приведенные выше схемы отражают известные особенности динамики верхнего слоя Черного моря. В первую очередь, отметим важнейшую составляющую поля течений – Основное черноморское течение, шириной 40–80 км, распространяющееся над континентальным склоном в циклоническом направлении. Для этого течения в отечественной литературе встречается и другое название – Кольцевое циклоническое течение (КЦТ) [90, 150], характеризующее особенности его структуры. Периодически формируются суббассейновые восточный и западный циклонические круговороты («очки Книповича»). Квазистационарные мезомасштабные антициклоны Севастопольский, Батумский, Синопский, Кавказский, Дунайский, Сакарьякский и др. также являются одной из основных черт циркуляции верхнего слоя моря. Отмечается образование цепочек мелких субмезомасштабных антициклонических вихрей между ОЧТ и берегом, количество которых максимально летом, в период ослабления и меандрирования ОЧТ [149, 196].

Известно также, что вертикальная термохалинная структура вод Черного моря характеризуется образованием верхнего квазиоднородного слоя и сезонного термоклина, формированием ХПС с температурой вод менее $+8^{\circ}\text{C}$, а также наличием слоя постоянного максимума вертикального градиента плотности – основного пикноклина, нижняя граница которого определяется на глубине ~ 300 м. Под основным пикноклином значения температуры и солености медленно возрастают ко дну [76].

Все основные особенности термохалинной и динамической структуры вод Черного моря воспроизводятся в результатах проведенного численного эксперимента по расчету климатических полей. Эксперимент позволил получить трехмерные поля температуры, солености, скорости, а также поле уровня моря. При этом климатические поля скорости и уровня отсутствовали в ассимилируемом в модели ГК массиве [6], а поля температуры и солености в результате численного расчета были детализированы. Так, исходный ГК массив, полученный в [6] 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 бóльших глуби-

нах. В результате численного эксперимента рассчитаны климатические поля с более высоким разрешением по времени и пространству – на сетке 5×5 км и на каждые сутки года.

Наибольшее количество восстановленных моделью мезомасштабных особенностей полей температуры и солёности находится в районах с их высокой изменчивостью – прибрежных регионах, областях вблизи устьев рек, проливов [37]. Детализация структуры полей температуры и солёности в результате численного моделирования позволяет более подробно рассматривать области с большими градиентами этих параметров. Например, на карте солёности для горизонта 50 м, относящемуся к верхней части основного пикноклина (Рисунок 2.3 (а)) отчетливо прослеживаются положительная аномалия в прибофторском районе, связанная с втоком более солёных мраморноморских вод, наблюдается погранслои в западной части моря, а также детализируется по сравнению с ГК (Рисунок 2.3 (б)) халинная структура вод в зоне действия Батумского антициклона и на СЗШ.

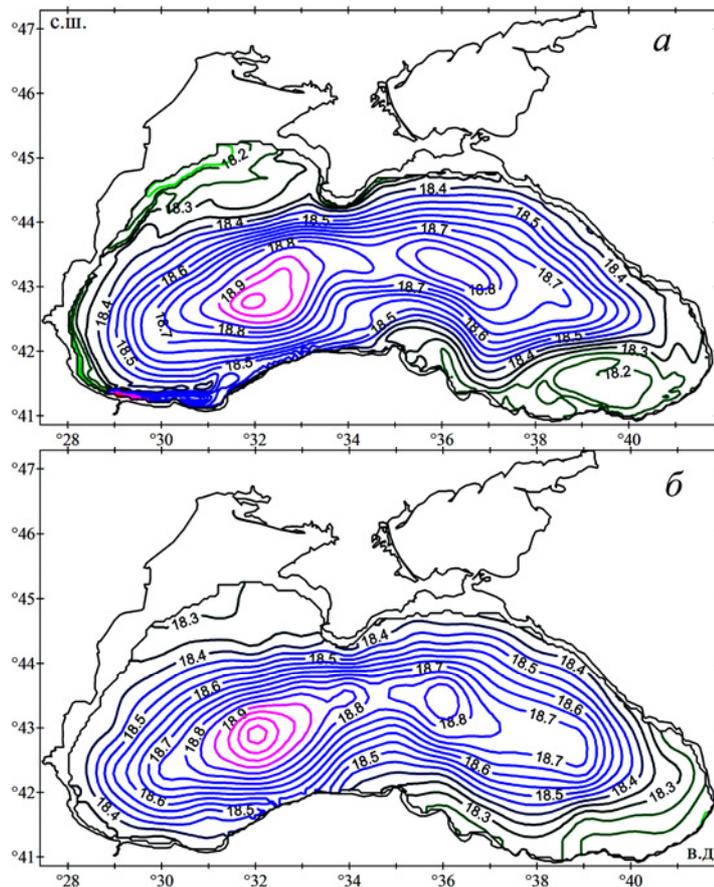


Рисунок 2.3 – Поле солёности на горизонте 50 м, 15 июля: а – модельная, б – ГК

Максимальные количественные отличия между расчетными и ГК значениями температуры не превышают $0,5^{\circ}\text{C}$ и существуют преимущественно на верхних горизонтах (до 20 м). В большинстве случаев (за исключением мая) модельная температура оказывается несколько ниже. Это может быть обусловлено несовершенством краевых полей, не обеспечивающих достаточного поступления тепла из атмосферы.

Вертикальная структура полей температуры и солёности показана на разрезе $43^{\circ}30'$ с.ш. (Рисунок 2.4). В зимний период воды у поверхности моря сильно охлаждаются, при этом становится практически изотермичным верхний слой толщиной 50–80 м. В весенние месяцы происходит прогрев поверхностных вод, формируется сезонный термоклин, который существует с апреля по август [37].

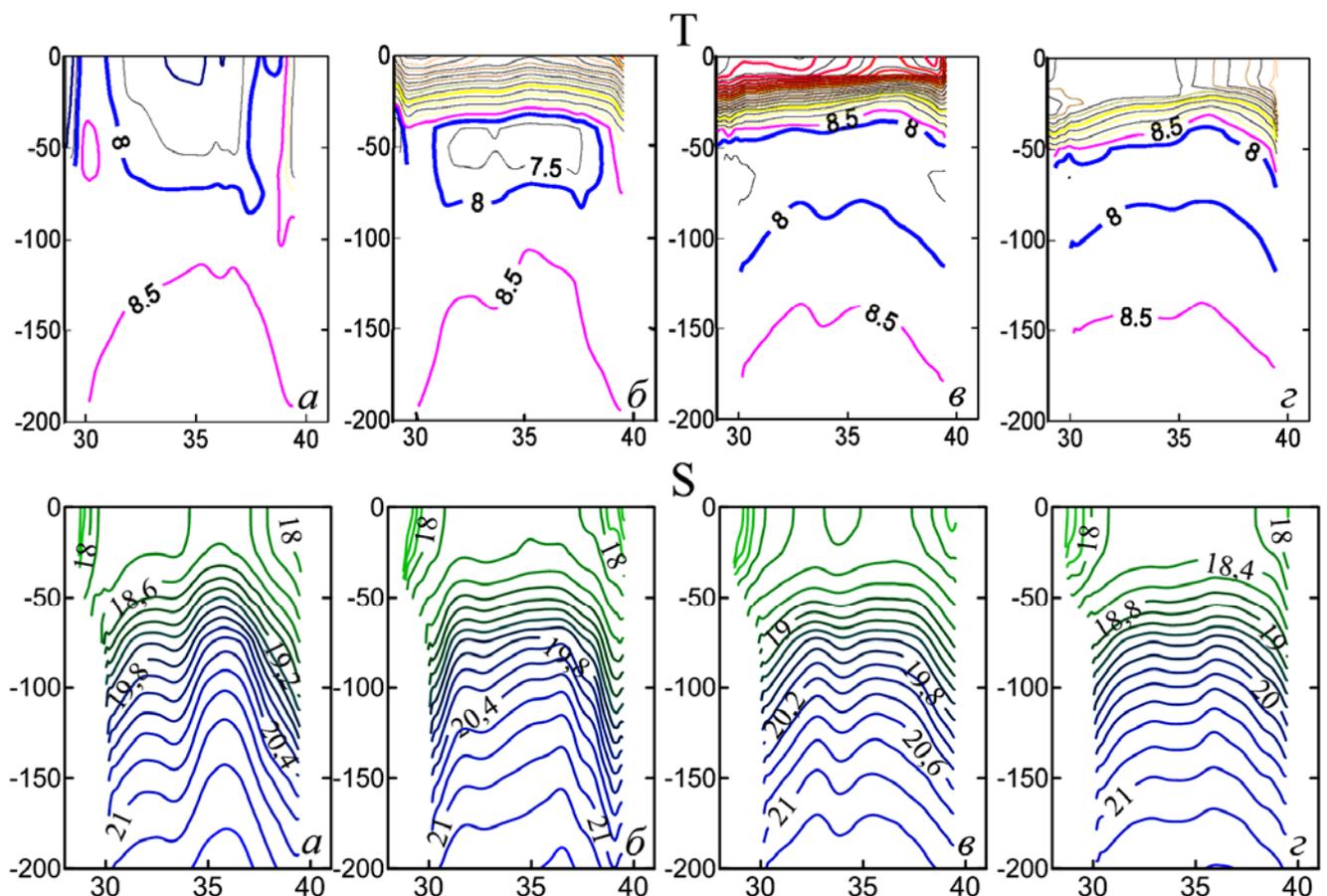


Рисунок 2.4 – Вертикальная структура модельных полей температуры и солёности на зональном разрезе $43^{\circ}30'$ с.ш.: *a* – февраль, *б* – май, *в* – август, *г* – ноябрь (на 15 число каждого месяца)

В марте заглубляется верхняя граница ХПС, ядро которого в марте-апреле располагается на глубине 40–50 м, а летом максимально опускается до 70 м. Верхняя граница ХПС находится на горизонтах до 50 м, а нижняя – до 80–120 м. В осенние месяцы по мере понижения температуры воздушных масс над морем происходит постепенное охлаждение поверхностного слоя вод. Под ним еще некоторое время сохраняется теплая прослойка, которая полностью исчезает к январю. Общая крупномасштабная структура модельного поля солёности соответствует ГК. Основными чертами распределения солёности по вертикали являются слой скачка в верхней части основного пикнолина на горизонтах 50–100 м и заглубление изохалин в прибрежных областях.

В слое 2,5–20 м воды северо-западного района имеют наиболее низкую солёность, ее величина колеблется от 15 до 17 ‰. В центральной части моря определяются наиболее высокие ее значения: 18–18,2 ‰ летом и 18,2–18,4 ‰ зимой, что соответствует характеру крупномасштабной циркуляции – подъему глубинных вод в центральной части моря и опусканию в прибрежных областях. Меньшие значения солёности в прибрежных районах обусловлены также наличием речного стока, наиболее интенсивного на СЗШ. Особенно значимо влияние стока в весенние месяцы, приводящее к понижению солёности до 16,6–17 ‰ у западного и до 16,8–17,2 ‰ у юго-восточного побережья [37].

Таким образом, крупномасштабная картина полученных в результате моделирования полей температуры и солёности в основных чертах совпадает с известной по данным гидрологических наблюдений, что является в первую очередь следствием процедуры ассимиляции ГК-полей в модели. Однако в результате моделирования получен также ряд мезомасштабных особенностей полей температуры и солёности, не содержащихся в усваиваемых массивах. Эти различия относятся преимущественно областям с высокой изменчивостью полей, где располагаются фронтальные зоны и присутствуют локальные динамические структуры. Сравнение модельных результатов с данными натурных наблюдений [134, 160] свидетельствует о наличии подобных особенностей в природе. Более подробное

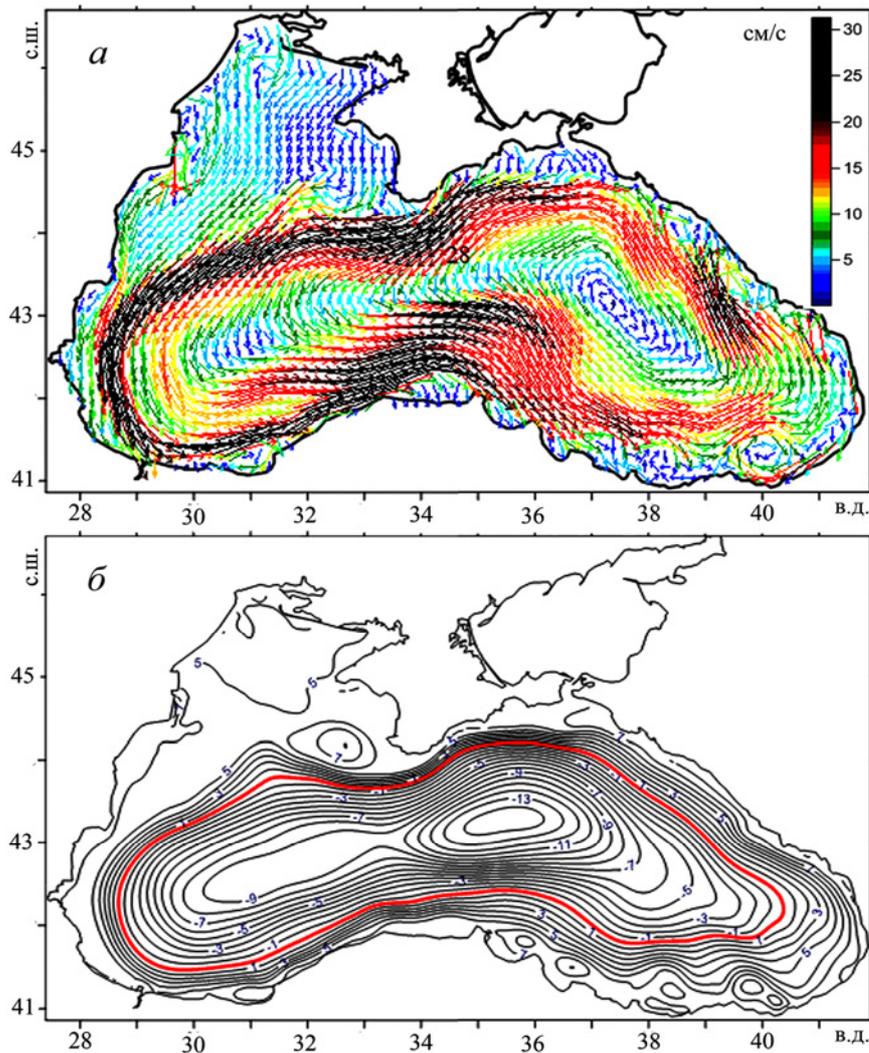
описание изменчивости климатических полей температуры и солености в верхнем слое моря представлено в работах диссертанта [37, 39, 41, 45, 106].

Наиболее важным результатом расчета климата Черного моря является получение трехмерного поля течений, согласованного со среднемноголетними данными наблюдений температуры и солености. Общее направление циркуляции является циклоническим, что видно из карт среднегодовых полей скоростей течений, которые для разных горизонтов представлены на Рисунках Б.1–Б.2 (Приложение Б).

Приведем основные особенности климатических течений в верхнем слое моря [37]. В эволюции рассчитанных полей прослеживаются сезонные колебания. В течение всего года над материковым склоном распространяется ОЧТ. В верхнем 100-метровом слое максимальные значения климатических скоростей в его стрежне составляют 50–55 см/с. Согласно изменчивости поля ветра, ОЧТ усиливается зимой, при этом наибольшие скорости достигаются южнее Крыма, и ослабевает летом. В зимний период восточный циклонический круговорот более мощный, чем западный. На протяжении весны он ослабевает, а к лету западный круговорот становится сильнее.

Севастопольский антициклон у берегов Крыма в весенне-летний период усиливается и смещается вдоль свала глубин на юго-запад справа от стрежня ОЧТ. Вдоль восточной части Анатолийского побережья (район устья р. Кызыл-Ирмак) в конце зимнего сезона формируется цепочка антициклонических вихрей, которые перемещаются на восток, а летом соединяются с Батумским антициклоном. Батумский антициклон, относительно слабый в зимний сезон, интенсифицируется весной и наибольшего развития достигает летом. В этот период он имеет сложную, часто многоядерную структуру, которая к осени преобразуется в единый антициклонический вихрь. Такая сезонная изменчивость обуславливается, в первую очередь, влиянием климатического поля ветра, а также взаимодействием ОЧТ и Батумского антициклона, развитие которого обеспечивается притоком энергии от ОЧТ.

Поле уровня в зоне действия ОЧТ имеет сглаженный характер (Рисунок 2.5), мезомасштабная изменчивость слабая, что объясняется влиянием ассимилируемых ГК температуры и солёности, которые меняются монотонно с небольшим градиентом по горизонтали, а также относительно гладкими климатическими граничными условиями [37].



го круговорота бассейнового масштаба, характерного для поверхностного слоя, не отмечается. На горизонте 350 м (Рисунок 2.6 (а)) в западной части моря – от Крыма до середины Анатолийского побережья – еще прослеживается нижняя часть ОЧТ. В течение года скорости в ней достигают 8 см/с, наибольшая интенсивность приходится на период с января по апрель [167].

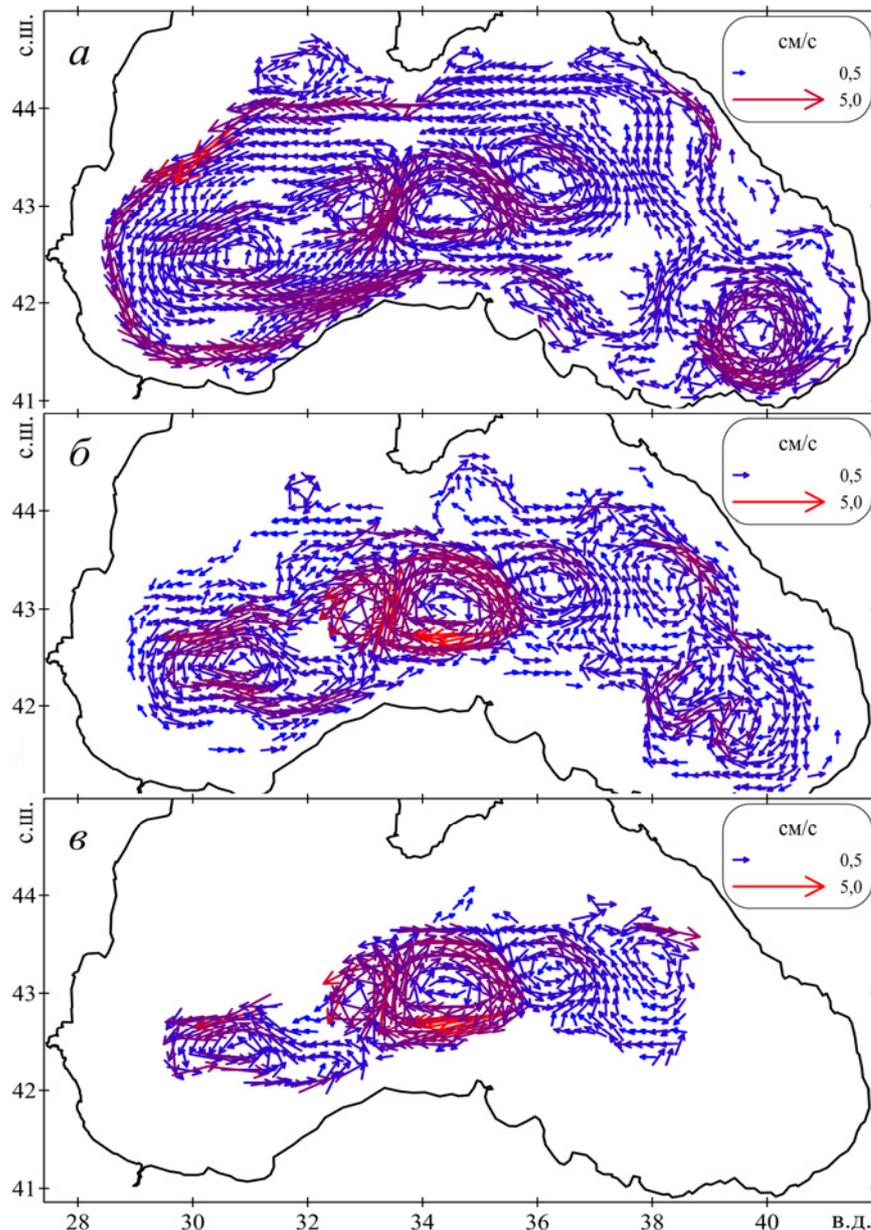


Рисунок 2.6 – Климатическое поле течений 19 июня: *а* – на горизонте 350 м, *б* – на горизонте 1000 м, *в* – горизонте 2100 м

В центральной абиссальной части бассейна на глубине 350 м преобладают мезомасштабные вихри, преимущественно циклонические, формирующиеся в

центре и на востоке. В летний период года образуются и антициклоны, большинство из них – в восточной части моря. Глубоководные вихри, постепенно ослабляясь и трансформируясь, смещаются со скоростями 1–2 см/с в западном направлении. Время жизни вихрей составляет в среднем 3–6 месяцев, горизонтальный размер – от 100 до 200 км, вертикальный – до дна (Рисунок 2.6), причем значительного ослабления скорости с глубиной не отмечается. В глубоководной, зонально вытянутой центральной части бассейна их перемещения наибольшие.

На свале глубин движение вихрей ограничивается рельефом дна, их взаимодействие с материковым склоном может приводить к трансформации и образованию более мелких вихревых структур. Так, на горизонтах более 500 м отмечается образование циклонических вихрей в той области моря, где на верхних горизонтах можно наблюдать Севастопольский антициклон (Рисунок 2.7 (б)).

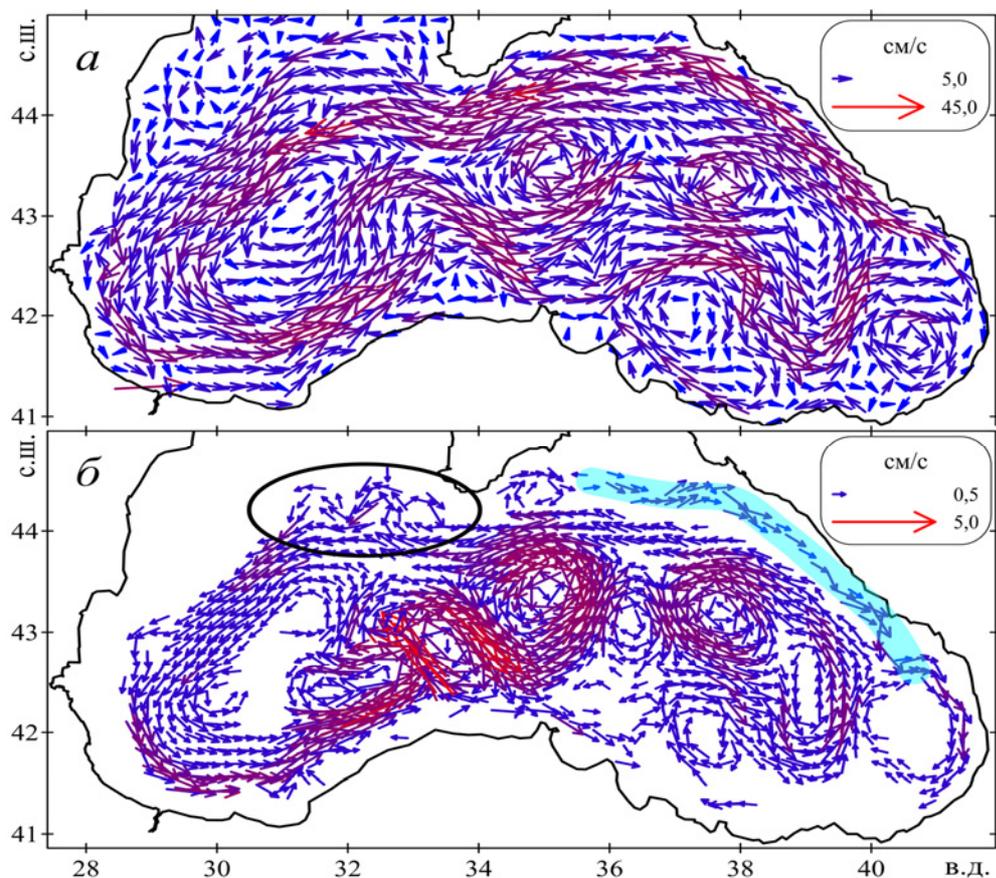


Рисунок 2.7 – Климатическое поле течений 4 апреля: *а* – на горизонте 20 м, *б* – на горизонте 500 м. На рисунке *б* черным обведены вихри к юго-западу от Севастополя, голубым цветом выделены АЦТ

Эти вихри имеют горизонтальные размеры до 50–80 км и скорости до 2 см/с, они могут формироваться обособленно, но чаще – в системе нескольких вихрей разных знаков завихренности. Наиболее крупные вихри здесь образуются в зимний и весенний сезон, когда вышележащее ОЧТ достаточно интенсивно, и на верхних горизонтах Севастопольский антициклон не сформирован или достаточно слаб (Рисунок 2.7 (а)). В летний период Севастопольский антициклон прослеживается до дна, на Рисунке 2.6 (б) он определяется на горизонте 1000 м.

Динамика моря в зоне действия Севастопольского антициклона, к юго-западу от побережья Крыма, изучалась ранее во многих работах. Полученный по данным наблюдений в конце 1980-х–начале 1990-х годов, эффект смены направления течений в зоне Севастопольского антициклона на глубинах 300–500 м был показан в публикациях [14, 95, 97]. Причем наиболее репрезентативные данные наблюдений скорости, демонстрирующие этот эффект, были получены именно в конце зимнего гидрологического сезона – во время мартовских съемок 1988 г. Позднее, уже на основе измерений ADCP, многослойная структура течений, формирующаяся при взаимодействии антициклона с особенностями дна, была определена в [98]. В модельных полях скорости эффект смены знака завихренности на глубинах 400–550 м в области Севастопольского антициклона показан в представленной работе впервые, опубликован в [26, 167].

Рассмотрим поле глубоководных течений на горизонте 350 м более подробно. В январе-феврале на свале глубин к юго-западу от Крымского п-ова обнаруживается глубинная часть Севастопольского антициклона, его ось наклонена на юго-запад, диаметр вихря на данной глубине составляет 115–125 км. Скорости в антициклоне – около 3 см/с. Весной и летом (с середины апреля по июль) Севастопольский антициклон увеличивается в масштабе примерно в полтора раза, при этом величины скоростей сохраняются. С середины августа антициклон несколько ослабевает (значения скоростей в это время составляют от 0,5 до 2 см/с) и снова усиливается во второй половине сентября. К декабрю размер этого вихря уменьшается до 75–80 км, а скорости – до 1 см/с. Интенсивность Севастопольского антициклона вновь возрастает к середине января.

Летом усиливается активность Батумского антициклона: в течение зимы на глубине 350 м скорости в вихре не превышают 2–3 см/с, в апреле-мае они возрастают до 4 см/с, а к июлю достигают 5 см/с.

С марта по июль на глубинах более 300 м у кавказского побережья в районе Геленджика обнаруживается направленное на юго-восток АЦТ со скоростями от 2,5 до 4 см/с. Так, на Рисунке 2.8 показано, что на горизонте 20 м течения направлены на СЗ, а на глубине 350 м в этой же области сформировано АЦТ. На горизонте 350 м оно имеет протяженность вдоль побережья около 70 км и ширину от 10 до 20 км [167]. Такие течения были обнаружены и по данным натурных наблюдений на нормальных к берегу разрезах (п. 1.4).

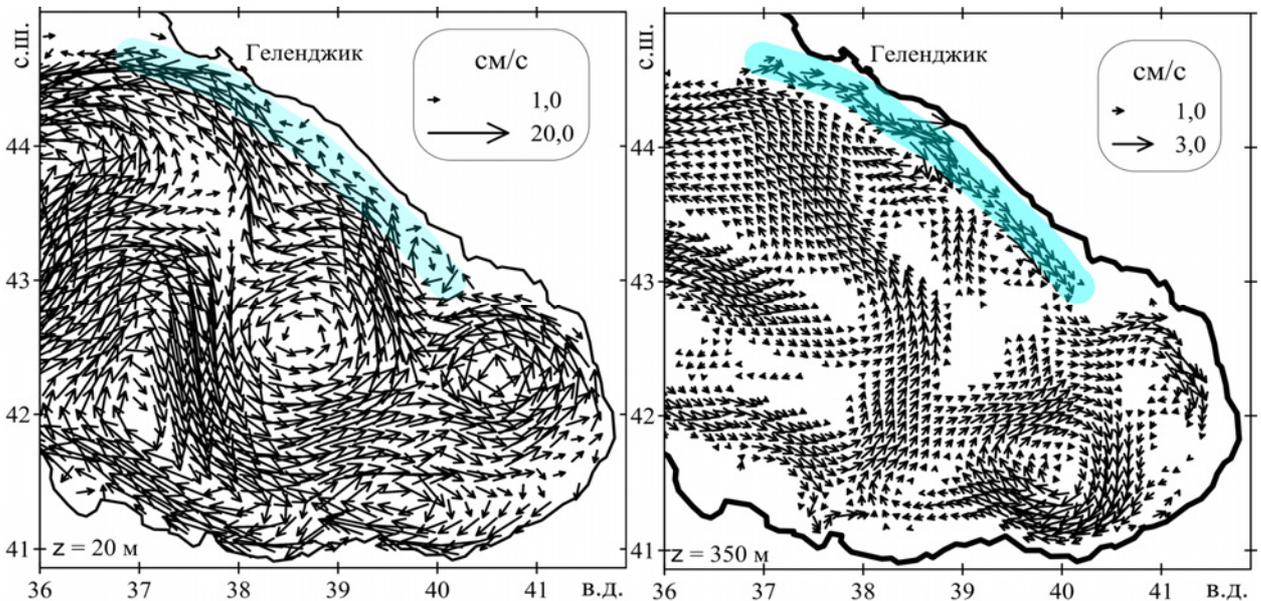


Рисунок 2.8 – Течения у северо-восточного побережья Черного моря (горизонты 20 м и 350 м, 15 апреля). Цветом выделен район формирования АЦТ

На глубине 500 м в юго-западной области моря еще прослеживается нижняя часть ОЧТ (Рисунок 2.7 (б)), но на горизонте 1000 м она уже не определяется, и значения скорости здесь сопоставимы со значениями в других частях бассейна.

На глубинах более 500–1000 м эволюция мезомасштабных вихрей в течение года такова. В январе в восточной части моря находится циклонический вихрь, в западной части сосредоточено 3 циклона. Батумский антициклон состоит из 2 или

3 отдельных вихрей. В феврале-марте циклонический вихрь из восточной части моря смещается к центру бассейна, Батумский антициклон ослабевает. К юго-западу от Севастополя находятся 1–2 циклона и антициклон меньшего размера. В апреле циклон в центре моря разделяется на ряд более мелких циклонических вихрей, к западу от Севастополя также определяется циклонический вихрь. С апреля по июль в восточной части моря формируются антициклонические вихри со скоростями до 2–3 см/с, количество которых может быть весьма значительным (Рисунок 2.9). К августу в восточной части бассейна формируется единый циклонический круговорот. В начале осени в центре моря находится циклонический вихрь диаметром около 100 км, а к декабрю его размер уменьшается вдвое. В зимнее время активность циклона в восточной части бассейна усиливается, а Батумского антициклона – снижается (максимальные скорости до 3 см/с). Скорости течений на горизонте 1000 м в этот период не превышают 3,5 см/с [167].

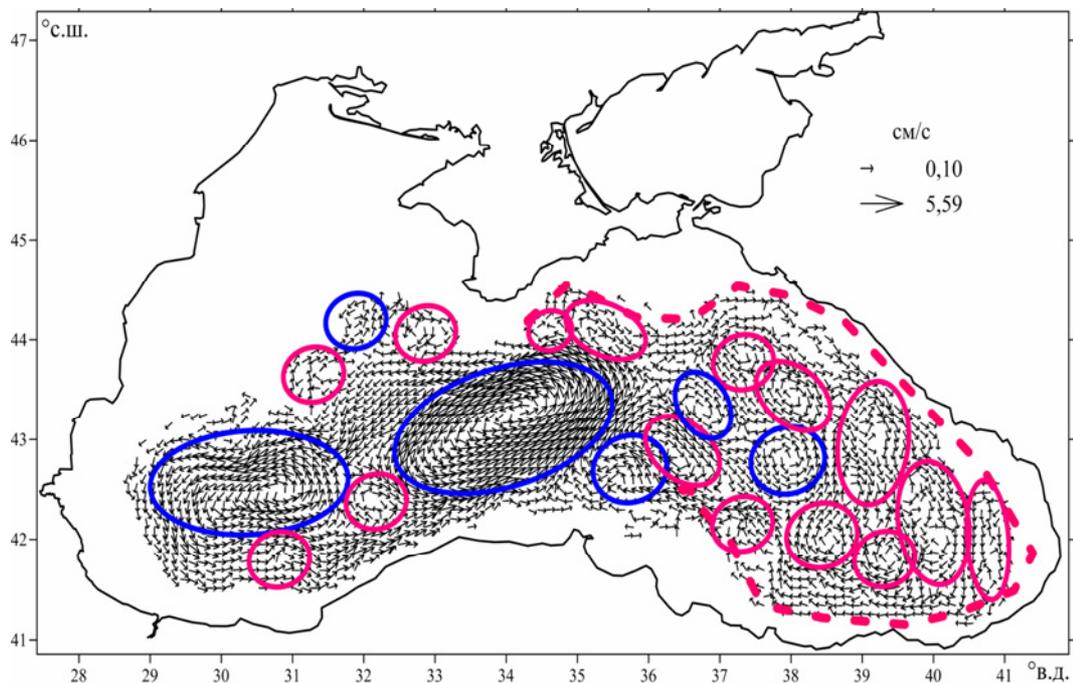


Рисунок 2.9 – Климатические течения на горизонте 1200 м 11 апреля. Красными линиями оконтурены антициклонические образования, синими – циклонические, сплошными линиями обведены вихри, пунктирной – АЦТ в восточной части моря

Таким образом, в отличие от верхнего слоя, на глубинах более 300 м наиболее мощные вихревые структуры (со скоростями до 5–7 см/с, и размерами до 200–250 км) характерны для центральной глубоководной области моря. Преобладают циклонические вихри, которые формируются в центре и на востоке абиссальной зоны. Антициклоны – более слабые: вихрь диаметром около 200 км появляется в центральной части только в летние месяцы, образовываясь в центре восточной половины моря. Горизонтальные размеры вихрей по периферии у материкового склона относительно невелики (до 80–100 км), а скорости малы (до 2 см/с).

Можно также отметить, что в соответствии с увеличением температуры с глубиной под основным пикноклином, в центрах циклонических вихрей в результате подъема глубинных вод происходит формирование областей с более высокими значениями температуры по сравнению с окружающими водами (положительных аномалий температуры), а в центрах антициклонов – отрицательных аномалий температуры (Рисунок 2.10). Это свойство глубоководных черноморских вихрей отличает их от подобных вихрей других районов мирового океана, где температура с глубиной уменьшается.

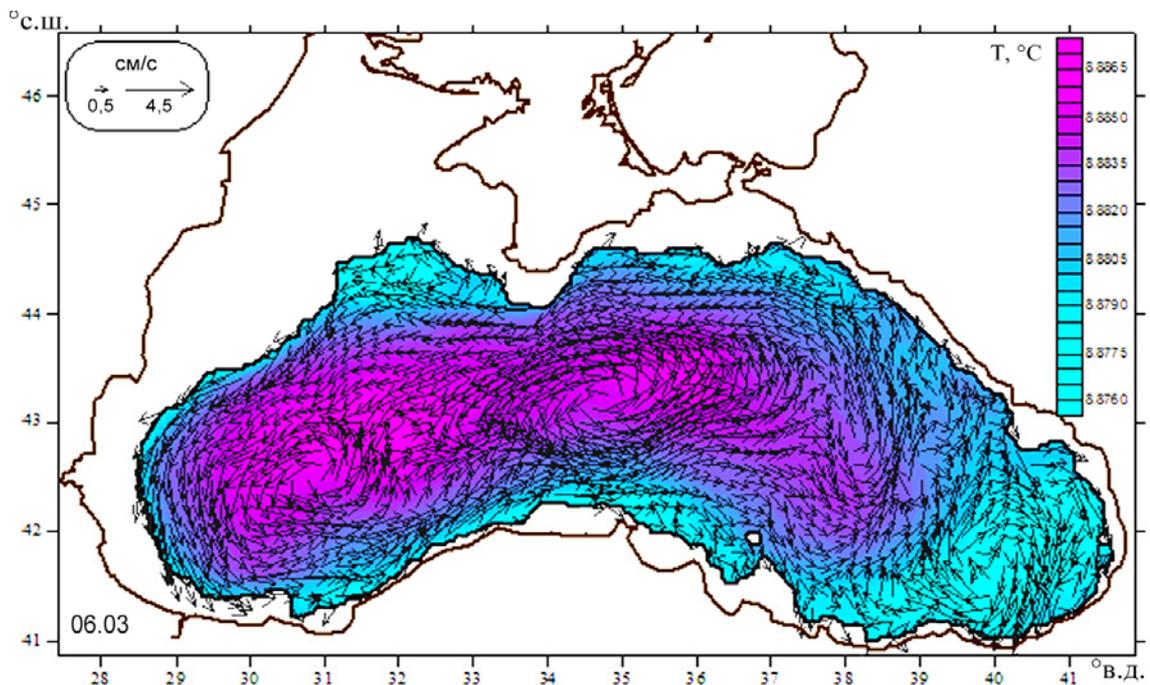


Рисунок 2.10 – Климатические поля температуры и течений 06.03, горизонт 500 м

2.4.3 Глубоководные течения антициклонической направленности. В

ходе анализа климатических течений было установлено, что на горизонтах 300–1800 м (преимущественно в весенне-летний период вдоль северо-восточного свала глубин) возникает узкое струйное течение антициклонической направленности, распространяющееся противоположно вышележащему ОЧТ [167, 169]. Эпизодически в течение года АЦТ может фиксироваться и в другое время, например, в начале февраля. Чаще всего это течение можно обнаружить в районе Новороссийска–Геленджика на глубинах 300 м и более.

На картах течений для весенне-летнего периода АЦТ показано на Рисунках 2.7 (б), 2.8 (б), 2.11. АЦТ существует с меняющейся интенсивностью: периоды усиления течения на срок от 1 до 4–5 недель сменяются периодами его ослабления или отсутствия на протяжении 1–2 недель. Из Рисунка 2.10 видно, что в начале марта такое течение отсутствует. Наличие АЦТ на разных горизонтах продемонстрировано на Рисунках Б.3–Б.4 Приложения Б. Течение распространяется вдоль побережья на юго-восток со скоростью 2,5–4 см/с. На Рисунке Б.5 на фоне батиметрии хорошо видно следование АЦТ изобатам.

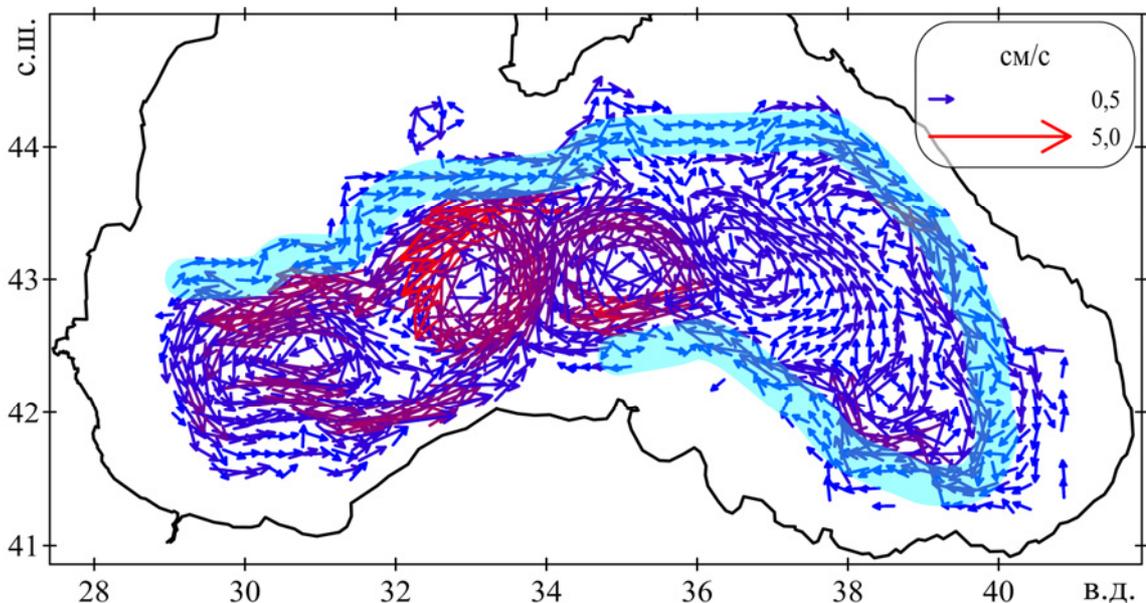


Рисунок 2.11 – Климатическое поле течений (горизонт 1500 м, 30 мая). Голубым цветом выделено АЦТ максимальной протяженности

В середине марта АЦТ начинает формироваться на горизонтах 300–500 м, его скорости в этот период составляют 1–2 см/с. К концу месяца скорости увеличиваются до 3 см/с и в апреле достигают 4 см/с. На Рисунке Б.6 показано, что образование АЦТ происходит на фоне эволюции мелких антициклонических вихрей у северо-восточного свала глубин и соответствующего опускания более холодных и более пресных вод. Наиболее выражено АЦТ в июне. С середины июля оно заглубляется, скорости на данных горизонтах снижаются до 0,5–1 см/с, и к августу течение исчезает. На горизонтах 600–800 м АЦТ обнаруживается во второй половине марта и существует в весенне-летний период с меняющейся интенсивностью. Его скорости на глубине 600 м составляют около 3 см/с, структура течения на этих горизонтах разрушается к концу июля. В районе Туапсе АЦТ опускается до горизонтов 1200–1400 м, распространяясь далее в юго-восточном направлении и достигая области Батумского антициклона [169].

В фазе наибольшего развития АЦТ находится с начала мая по середину июня (на Рисунке 2.11 выделено голубым цветом). В это время отмечается наиболее мощная и стабильная струя течения, прослеживаемая до горизонта 1800 м. Также в этот период АЦТ является наиболее протяженным: оно распространяется от болгарского побережья на западе, следуя вдоль северной части материкового склона до северокавказского побережья, далее на юго-восток и затем к центральной части моря вдоль восточно-анатолийского берега, огибая, таким образом, всю восточную половину моря. Его характерные скорости составляют 1,5–2 см/с, а к юго-востоку от Геленджика течение усиливается до 3–4 см/с. Хотя скорости АЦТ в климатических полях довольно низкие, они превышают фоновые значения в 2–3 раза. Скорости течения максимальны в зонах сужения свала глубин и уменьшаются при его расширении. Подобное поведение течений в придонной зоне было показано в [140]. Глубинная часть АЦТ определяется на горизонте 1800 м с середины мая, его средняя скорость здесь составляет около 1,5 см/с, а максимальная – 2,5–3 см/с [113, 169].

В отношении наличия глубоководных АЦТ результаты проведенного расчета согласуются не только с данными натурных наблюдений на полигоне в Ге-

ленджике (п. 1.4), но и с рядом других исследований по моделированию климатических полей Черного моря [119]. Антициклоническая направленность придонных климатических течений в Черном море была установлена в работе [140]. В МГУ на основе Бергенской модели был проведен численный эксперимент [2], показавший наличие антициклонического течения в климатических полях на глубинах более 1300 м во все сезоны. В работе [102] показано наличие глубинных антициклонических течений по результатам климатических расчетов на основе модели ИВМ РАН. Таким образом, обнаружение узких струйных АЦТ в глубинных слоях согласуется с имеющимися наблюдениями и расчетами других авторов. С помощью анализа результатов проведенного численного моделирования с ассимиляцией в модели ГК данных удалось уточнить локализацию, основные характеристики и пространственно-временную изменчивость таких течений.

Выводы к Разделу 2

На основе 3-мерной нелинейной модели МГИ динамики Черного моря рассчитаны климатические поля температуры, солёности, течений, уровня моря на сетке 5 км по горизонтали и на 45 горизонтах по вертикали. Они согласуются и дополняют ГК-данные о температуре и солёности [6]. Наиболее важным результатом является построение трехмерного климатического поля течений для всего бассейна, реконструкция которого только на основе имеющихся данных наблюдений, без привлечения моделей динамики моря, не представляется возможной.

В результатах расчета воспроизведены известные особенности циркуляции верхнего слоя Черного моря и их сезонная эволюция. Проведено изучение пространственно-временной изменчивости построенного климатического поля течений. Показано, что структура поля течений Черного моря под основным пикноклином значительно отличается от структуры в верхнем 300-метровом слое. При сохранении общей циклонической направленности циркуляции, единый круговорот ОЧТ на горизонтах более 300 м отсутствует. В западной части моря нижняя часть ОЧТ в климатических полях определяется до глубины ~500 м, где ее интен-

сивность максимальна в период с января по апрель, а скорости достигают 8–10 см/с. В западной и восточной частях моря, где на верхних горизонтах доминируют суббассейновые циклонические круговороты, на глубинах более 300 м преобладают мезомасштабные вихри разных знаков завихренности, прослеживающиеся до дна.

Рассчитанные величины климатических скоростей под основным пикноклином в среднем на порядок ниже, чем на поверхности: фоновые значения скоростей – до 2 см/с, и довольно высокие значения (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, со временем ослабевают и смещаются в западном направлении со скоростями 1–2 см/с. Установлена смена знака завихренности в области Севастопольского антициклона на глубинах 400–550 м. Этот эффект соответствует данным отдельных натуральных наблюдений, выполненных в разные годы [14, 95, 97, 98].

Показано, что 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 других районов океана.

Обнаружено наличие квазипериодических климатических течений антициклонической направленности, наиболее часто возникающих в весенне-летний период у северокавказского побережья. АЦТ 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 вдоль свала глубин от нескольких десятков до нескольких сотен километров и ширину от 10 до 20 км, время их жизни достигает нескольких недель.

Основные результаты Раздела 2 опубликованы в статьях [26, 36–38, 41, 51, 119, 126, 127, 167, 169], тезисах и материалах конференций [3, 25, 27, 39, 45, 106–108, 110, 113, 115, 117, 118, 120, 123–125, 129, 192, 194].

РАЗДЕЛ 3 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
С РЕАЛЬНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Основной идеей, реализованной в текущем разделе, является анализ глубоководных течений Черного моря по данным численных расчетов с учетом реального атмосферного воздействия. Эксперименты были проведены на основе модели МГИ в рамках различных научных проектов (этим обуславливается выбор периодов моделирования), но полученные в них результаты для оценки глубоководной циркуляции ранее не применялись. Для исследования глубоководных течений, таким образом, были собраны выходные массивы данных прогностических численных экспериментов на сетке 1,6 км [77, 168], результаты расчетов по воспроизведению динамики Черного моря в условиях аномального атмосферного воздействия [35, 40, 135, 136], а также расчетные данные многолетних реанализов гидрофизических полей [171] и [144]. Установленные по данным расчетов особенности глубоководных течений обобщаются и сопоставляются с данными натурных наблюдений.

3.1 Условия проведения численных экспериментов и параметры модели

Для всех приводимых ниже численных экспериментов использовалась модель МГИ динамики Черного моря, представленная в Разделе 2 в применении к расчету климатических полей (уравнения (2.1)–(2.16)). В постановке задачи для экспериментов прогностического типа есть некоторые отличия. Поскольку прогностические расчеты проводятся без ассимиляции трехмерных полей температуры и солености, в правых частях уравнений адвекции–диффузии тепла и соли (2.7), (2.8) ассимиляционные слагаемые отсутствуют и соответствующие уравнения имеют вид

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^T T_z)_z, \quad (3.1)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^S S_z)_z. \quad (3.2)$$

Таким образом, рассматривается система уравнений (2.1)–(2.6), (3.1)–(3.2) с граничными условиями (2.9)–(2.15).

Начальные условия (2.16) также заменяются – на ненулевые

$$u = u^0(x, y, z), \quad v = v^0(x, y, z), \quad \zeta = \zeta^0(x, y), \quad T = T^0(x, y, z), \quad S = S^0(x, y, z), \quad (3.3)$$

где индекс «0» означает известные, заданные на начальный момент поля.

Для получения начальных условий в расчетах динамики в 2006 и 2011 гг. использовались результаты климатического эксперимента (Раздел 2), в расчетах на 2010 и 2013 гг. – результаты гидрофизического реанализа [144]. Данные были интерполированы на расчетную сетку 1,6 км.

Для согласования поля скорости и поля плотности при новых граничных условиях использовалась процедура квазигеострофического приспособления, которая заключалась в следующем [28, 54]. Проводился дополнительный расчет, в котором в качестве начальных полей использовались указанные интерполированные поля уровня, температуры, солености и горизонтальных компонент скорости. Система уравнений модели интегрировалась при зафиксированных граничных условиях, соответствующих начальному моменту основного расчета. Время счета определялось согласно условию минимизации ошибки ε выполнения интегрального уравнения неразрывности $\varepsilon = \frac{1}{\Sigma} \iint_{\Sigma} \left[\int_0^H (u_x + v_y) dz \right] d\Sigma$ и составляло от 2 до 4

суток. Полученные таким образом поля были использованы в дальнейших экспериментах в качестве начальных (с индексом «0» в (3.3)).

Для описания процессов вертикального турбулентного перемешивания в численных экспериментах с учетом реального атмосферного воздействия, в отличие от расчета климата, используется модель турбулентности Меллора–Ямады 2.5 [31, 197]. Как было показано в работах [5, 30, 35], наибольшие отличия

в результатах моделирования при использовании параметризаций Пакановски–Филандера и модели турбулентности Меллора–Ямады 2.5 достигаются в периоды интенсификации ветрового воздействия. В случае задания относительно гладких климатических атмосферных полей результаты моделирования слабо чувствительны к выбору указанных способов описания турбулентности [5, 50], но при моделировании динамики моря в реальных синоптических ситуациях модель Меллора–Ямады 2.5 дает лучший результат, более быстро реагируя на изменения в состоянии атмосферы. Согласно этой модели, для определения коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии ν^V , κ^V совместно с уравнениями (2.1)–(2.6), (3.1)–(3.2), граничными (2.9)–(2.15) и начальными условиями (3.3) решается система уравнений относительно кинетической энергии турбулентности e^2 и макромасштаба турбулентности l . Уравнения записываются следующим образом [35, 197]

$$\frac{de^2}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^V \frac{\partial e^2}{\partial z} \right) + 2\nu^V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} \kappa^V \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2e^3}{B_1 \lambda} + \nu^e \nabla^4 e^2, \quad (3.4)$$

$$\frac{d(e^2 \lambda)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^V \frac{\partial (e^2 \lambda)}{\partial z} \right) + \lambda E_1 \nu^V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\lambda E_3 g}{\rho_0} \kappa^V \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{e^3}{B_1} H + \nu^e \nabla^4 (e^2 \lambda), \quad (3.5)$$

где H – эмпирическая функция;

$E_1=1,8$; $E_3=1,8$; $B_1=16,6$ – эмпирические константы;

$\nu^e = \nu_H$.

Соотношения для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена ν^V и вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли κ^V имеют вид

$$\nu^V = l e S_H, \quad \kappa^V = l e S_M,$$

где S_H, S_M – функции устойчивости, определяющиеся из эмпирических соотношений [197].

Эта система уравнений дополняется соотношением для расчета μ^V

$$\mu^V = leS_e, \quad (3.6)$$

где $S_e = 0,2$ – эмпирическая константа.

На систему (3.4)–(3.6) накладываются следующие граничные условия.

На боковых границах и на дне

$$e^2 = 0, \quad e^2 l = 0, \quad (3.7)$$

на поверхности моря

$$e^2 = B_1^{2/3} [(\tau^x + \tau^y)/\rho_0^2]^{1/2}, \quad e^2 l = 0. \quad (3.8)$$

Начальными условиями для системы (3.4–3.6) являются

$$e = e^0, \quad l = l^0, \quad (3.9)$$

где $e^0 = 10 \text{ см}^2/\text{с}^2$,

$l^0 = 10 \text{ см}$.

Таким образом, при проведении прогностических расчетов решаются уравнения (2.1)–(2.6), (3.1)–(3.2) и (3.4)–(3.6) с начальными условиями (3.3) и (3.9) и граничными условиями (2.9)–(2.15), (3.7)–(3.8) соответственно.

Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости принимаются равными $10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$, горизонтальной турбулентной диффузии $5 \times 10^{14} \text{ см}^4/\text{с}$. Шаг расчетной сетки по горизонтали в данных экспериментах составляет 1,6 км, что по-

зволяет более детально воспроизводить динамику морской среды [30, 34, 42]. По вертикали трехмерные поля рассчитываются на 27 горизонтах; шаг по времени составляет 1,5 мин.

Численные эксперименты проводились для следующих периодов: 2006 г. (полностью), 2011 г. (полностью), сентябрь–декабрь 2010 г., май–сентябрь 2013 г. В качестве краевых полей на поверхности моря использовались данные атмосферных моделей: ALADIN [177] – для расчета на 2006 г., SKIRON [204] – для численных экспериментов на 2011 г., ERA-Interim [165] – для расчета динамики Черного моря в 2010 и 2013 г.

Результаты расчетов были осреднены за каждые сутки, и таким образом для дальнейшего анализа брались ежесуточные поля уровня, температуры, солёности и скорости для всего Черного моря.

3.2 Валидация результатов моделирования с использованием данных ARGO наблюдений температуры и солёности

Чтобы оценить корректность результатов прогностических расчетов на основе численной модели МГИ с разрешением 1,6 км, в том числе в глубинных слоях моря, проведено сравнение рассчитанных значений с данными натурных наблюдений температуры и солёности, полученных с помощью автономных буев-профиломеров ARGO [159]. Для варианта модели с разрешением 5 км подобное исследование было выполнено ранее [170]. На предмет соответствия наблюдениям были исследованы результаты численного эксперимента, проведенного на весь 2011 г. с атмосферным форсингом SKIRON [204].

Рассчитывались средние (СО) и среднеквадратические отклонения (СКО) модельных значений температуры и солёности от наблюдаемых. К исследованию были привлечены данные только тех буев ARGO, которые осуществляли профилирование с глубины не менее 500 м до поверхности моря. Таким образом, была использована информация 6 буев, дрейфовавших в 2011 г. в Черном море на различных парковочных глубинах и запрограммированных на вертикальное

профилирование с горизонтов 500 и 1500 м до поверхности. Наблюдения с помощью буев ARGO выполнялись регулярно во все сезоны, периодичность профилирования составляла 5 суток. Всего было рассмотрено 377 профилей температуры и столько же – солености и обработано несколько десятков тысяч мгновенных измерений этих параметров [109].

Аналогично [170], для статистического анализа все полученные данные были разделены по слоям: подповерхностный слой (0–5 м), верхний перемешанный (5–30 м), холодный промежуточный (30–100 м), отдельно рассматривались воды основного пикноклина на глубинах 100–300 м. Под пикноклином были выделены два слоя: от 300 до 800 м и от 800 до 1500 м, горизонт 1500 м являлся максимумом глубины профилирования поплавками ARGO в 2011 г. Модельные температура и соленость были взяты из точки расчетной сетки, ближайшей к выполненному ARGO профилю, затем рассчитывались отклонения модельных значений от наблюдаемых на горизонтах модели. Значения отклонений, посчитанные для всех буев, были осреднены по выбранным слоям, результаты расчетов приведены в Таблице 3.1 (знак минус означает, что модельные значения выше измеренных) [109].

Таблица 3.1 – Отклонения модельных значений температуры и солености от наблюдаемых буями ARGO в 2011 г.

Глубина, м	Отклонение температуры, °С		Отклонение солености, ‰	
	СО	СКО	СО	СКО
0–5	0,167	0,182	-0,154	0,177
5–30	0,206	0,386	-0,164	0,172
30–100	0,200	0,242	0,007	0,326
100–300	0,107	0,112	0,231	0,239
300–800	-0,009	0,013	-0,072	0,091
800–1500	-0,026	0,027	0,001	0,007

Установлено, что максимальные отклонения температуры достигались в слое 5–30 м, а солености – в слое 30–100 м. Ниже горизонта 300 м СКО

модельных значений от измеренных не превышало $0,03^{\circ}\text{C}$ и $0,09\text{‰}$ для температуры и солёности, соответственно.

Также были исследованы вертикальные профили отклонений температуры и солёности вдоль траекторий всех 6 поплавков в течение года. На Рисунке 3.1 приведен пример распределения отклонений температуры и солёности вдоль траектории буя № 6900803 в течение 2011 г. Наибольшие значения отклонений модельных температуры и солёности от наблюдаемых получены для летнего и осеннего периодов – с августа по ноябрь [109].

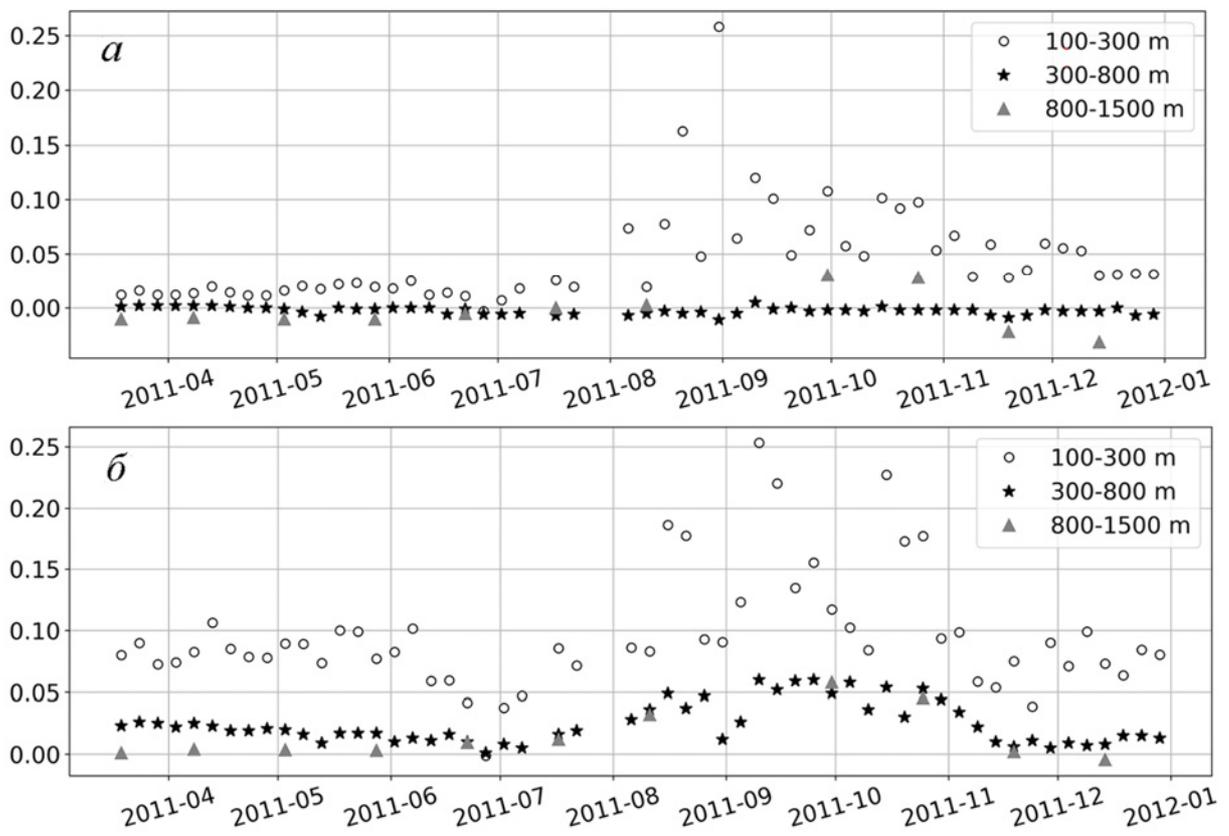


Рисунок 3.1 – Отклонения модельных значений от измеренных вдоль траектории буя № 6900803 в 2011 г.: *а* – температуры ($^{\circ}\text{C}$), *б* – солёности (‰)

В единичных случаях максимальные различия в значениях температуры достигали нескольких градусов, но только в верхнем перемешанном слое.

Таким образом, сравнение данных моделирования полей температуры и солёности с данными натурных наблюдений показало их согласование на глубинах более 300 м. Как для температуры, так и для солёности абсолютные

величины отклонений довольно малы и в некоторых случаях даже являются сопоставимыми с точностью измерений датчиков, устанавливаемых на поплавках ARGO (0,002 °C и 0,005 ‰ соответственно) [109, 159]. Это свидетельствует об адекватности воспроизведенных модельных полей и позволяет рассматривать особенности построенного поля течений в глубинных слоях.

3.3 Анализ глубоководных течений Черного моря по результатам прогностических расчетов

Анализ полей скорости, полученных в результате численных экспериментов с реальным атмосферным воздействием в 2006, 2010, 2011 и 2013 гг. на сетке 1,6 км показал существование следующих особенностей глубоководной динамики Черного моря.

Как единый циклонический круговорот на горизонтах более 300 м ОЧТ не наблюдается, однако в западной части моря прослеживается его нижняя часть, особенно интенсивная зимой и начале весны (по середину апреля). Такая структура течения просматривается до глубины 500–700 м, а зимой – до 1200 м, его скорости достигают 10–15 см/с [51].

На горизонтах более 300 м в течение года преобладают мезомасштабные вихри разных знаков завихренности и нерегулярные узкие течения вдоль материкового склона. При исследовании полей скорости на отдельных горизонтах, то можно отметить наличие струйных течений – как циклонической (преимущественно в юго-западной части), так и антициклонической направленности. Общее направление циркуляции в бассейне остается при этом циклоническим.

Узкие течения, прослеживающиеся в юго-западной части моря в конце осени и зимой до горизонтов 1000–1200 м имеют циклоническую направленность и являются следствием общего сезонного усиления ОЧТ, которое в нижней части может достигать указанных глубин (Рисунок 3.2).

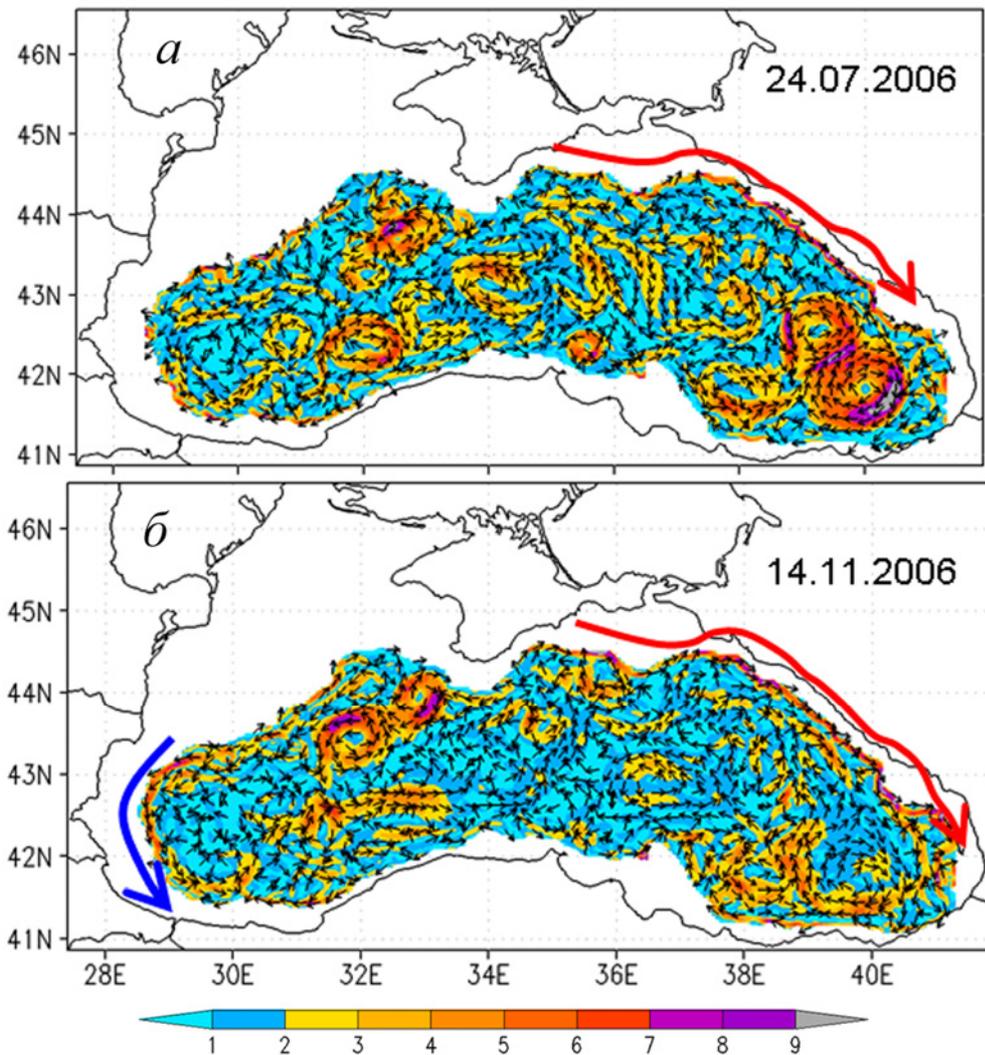


Рисунок 3.2 – Поля течений на горизонте 1100 м в расчете на 2006 г. Дополнительными стрелками указаны течения циклонической направленности (синяя стрелка) и АЦТ (красная стрелка)

АЦТ наиболее часто обнаруживаются в районе северокавказского побережья, но могут формироваться и в других частях моря (Рисунки 3.3 (а) и 3.4 (а)). Такие течения определяются в расчетах на сетке 1,6 км начиная с горизонта 1000 м, что частично перекликается с результатами расчета климата моря, где АЦТ отмечаются уже с глубины 300 м и аналогично достигают нижней части материкового склона.

Рассмотрим особенности построенного поля течений более подробно. В результатах всех прогностических расчетов на сетке 1,6 км получены АЦТ,

распространяющиеся вдоль свала глубин на горизонтах 1000 м и более. Примеры карт течений показаны на Рисунках 3.2–3.4.

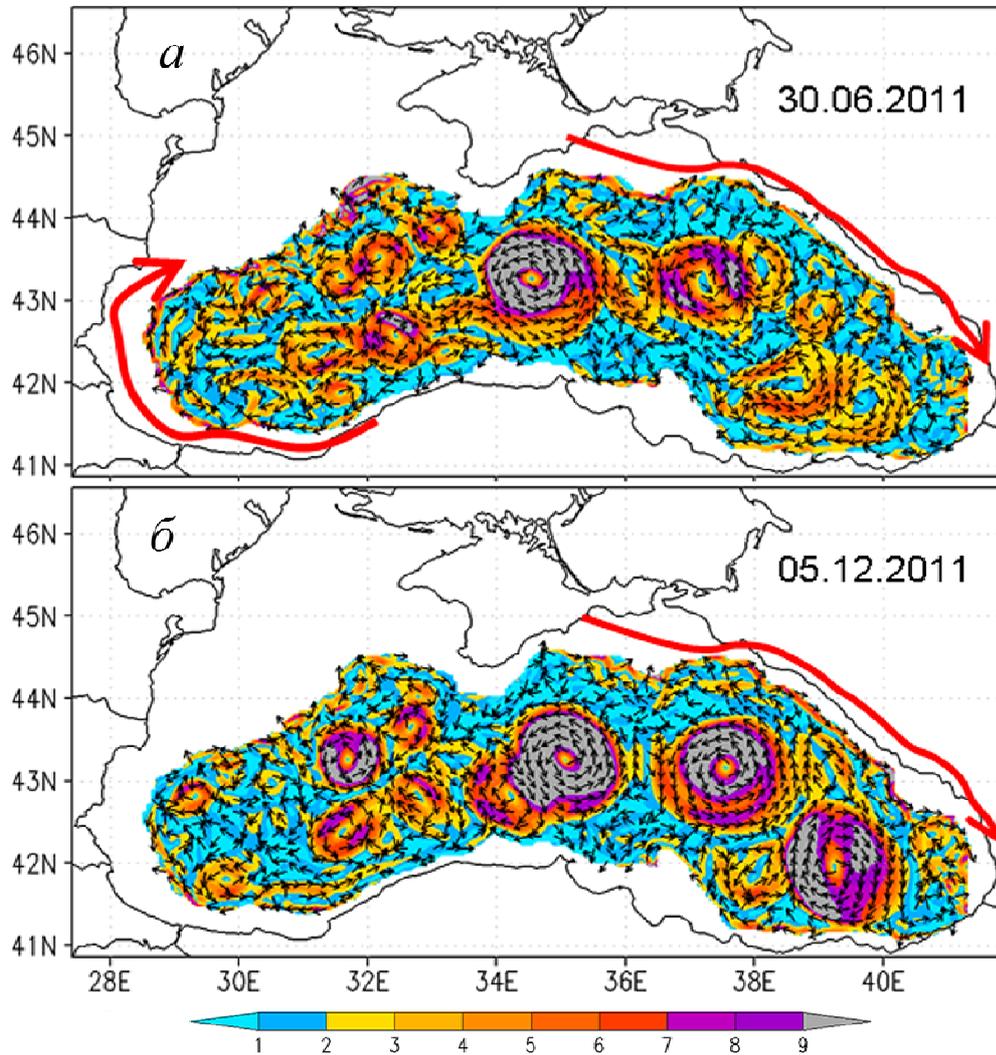


Рисунок 3.3 – Поля течений на горизонте 1100 м в расчете на 2011 г. АЦТ продублированы дополнительными красными стрелками

Наиболее часто АЦТ обнаруживаются в районе узкого северо-восточного свала глубин примерно между $34,5^\circ$ и 41° в.д. Здесь, в слое 1000–1700 м, они наблюдаются квазипериодически во все сезоны. Так, например, в феврале–марте 2006 г. скорость АЦТ составила 4–5 см/с, время его существования – 15–20 суток, протяженность – от 100 до 150 км. В апреле оно снова стало формироваться у м. Меганом, ширина его составляла 5–8 км, средняя скорость – 7 см/с. К маю АЦТ

усилилось, его протяженность увеличилась до 300 км, а средняя скорость возросла до 8 см/с [51].

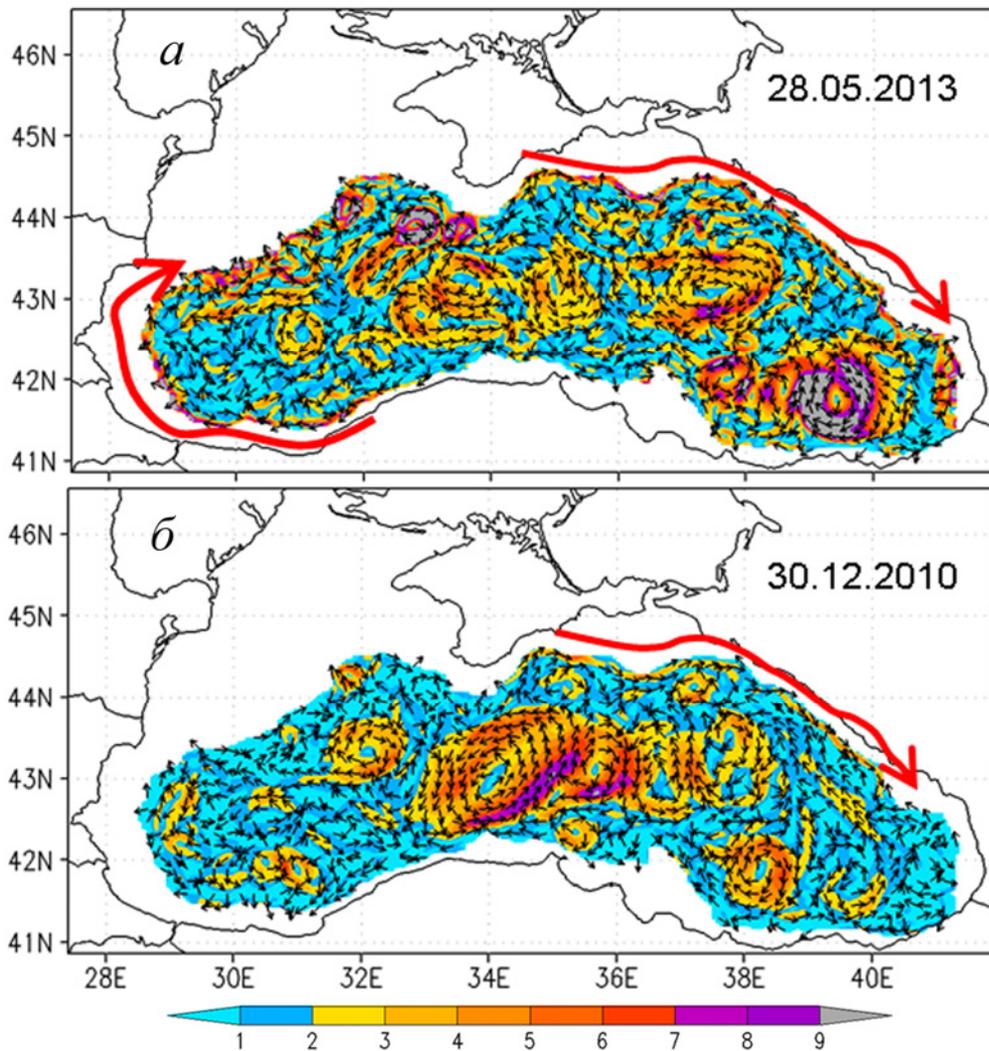


Рисунок 3.4 – Поля течений на горизонте 1100 м в расчетах на 2010 г. и 2013 г.
АЦТ продублированы дополнительными красными стрелками

В летние месяцы АЦТ у северокавказского побережья наиболее интенсивно. Максимальная ширина летом по всем расчетам на сетке 1,6 км достигалась юго-западнее Геленджика и Сухуми и составляла 8–12 км. Максимальные скорости (на горизонте 1100 м до 15–20 см/с) получены в июле–августе 2006 г. и во второй половине июня 2013 г. Они фиксировались к югу от берегов Абхазии и на свале глубин южнее Керченского полуострова. С увеличением глубины скорости АЦТ в эти периоды уменьшались до 4–5 см/с [51, 127].

Анализ карт течений за 2006, 2010 и 2011 гг. показал, что АЦТ возникают и в холодный период года. В осенне-зимний сезон они существуют порядка двух недель, их средние скорости составляют 3–4 см/с. На свале глубин у северокавказского побережья в зимний период скорости могут достигать 4–5 см/с, а ширина течения местами доходит до 10–12 км. Таким образом, АЦТ в этом районе носят квазипериодический характер, формируясь чаще в весенне-летний период и имеют среднюю продолжительность 3–4 недели [51].

АЦТ отмечаются и в юго-западной части моря, там их присутствие было установлено в летние месяцы 2006, 2011 и 2013 гг. Их ширина на горизонте 1100 м не превышала 5 км, средняя скорость составляла 6–8 см/с, с конца июня уменьшаясь до 4 см/с. Наибольшей интенсивности АЦТ достигают, когда вышележащее ОЧТ ослабевает и его скорости не превышают 25–30 см/с в соответствующем районе.

АЦТ обнаруживаются и в нижней части материкового склона, на глубинах 1500–1700 м. Для 2006 и 2013 гг. на горизонте 1500 м наиболее ярко были выражены течения у южной границы СЗШ, северо-восточные течения со скоростями до 8–12 см/с наблюдались здесь с марта по июнь. На глубине 1700 м в апреле-мае и августе-сентябре 2006 г. вдоль Анатолийского побережья распространялось юго-западное течение шириной около 5 км и скоростями до 7 см/с [127].

Вдоль материкового склона определяется ряд довольно слабых антициклонических вихрей, скорости в которых составляют 1–2 см/с. Из Рисунка 3.5 видно, что АЦТ распространяются между такими вихрями и склоном. Подобные противотечения (*undercurrents*), связываемые с прохождением у свала глубин мезомасштабных антициклонических вихрей, для других районов Мирового океана уже были обнаружены, к примеру, для западного побережья Бенгальского залива они показаны в работе [178]. В районах антициклонов под основным пикноклином происходит опускание вод, что приводит к образованию областей с пониженными значениями температуры и солёности (Рисунок Б.7 Приложения Б).

К юго-западу от Крымского п-ва, где в верхнем слое наблюдается Севастопольский антициклон, периодически формируются 2–3 вихря масштабом 50–

80 км с довольно высокими для глубоководной области скоростями – более 15 см/с. Эта особенность поля скорости – формирование нескольких вихрей неодинакового знака завихренности в области Севастопольского антициклона отмечалась и в климатических полях (Раздел 2).

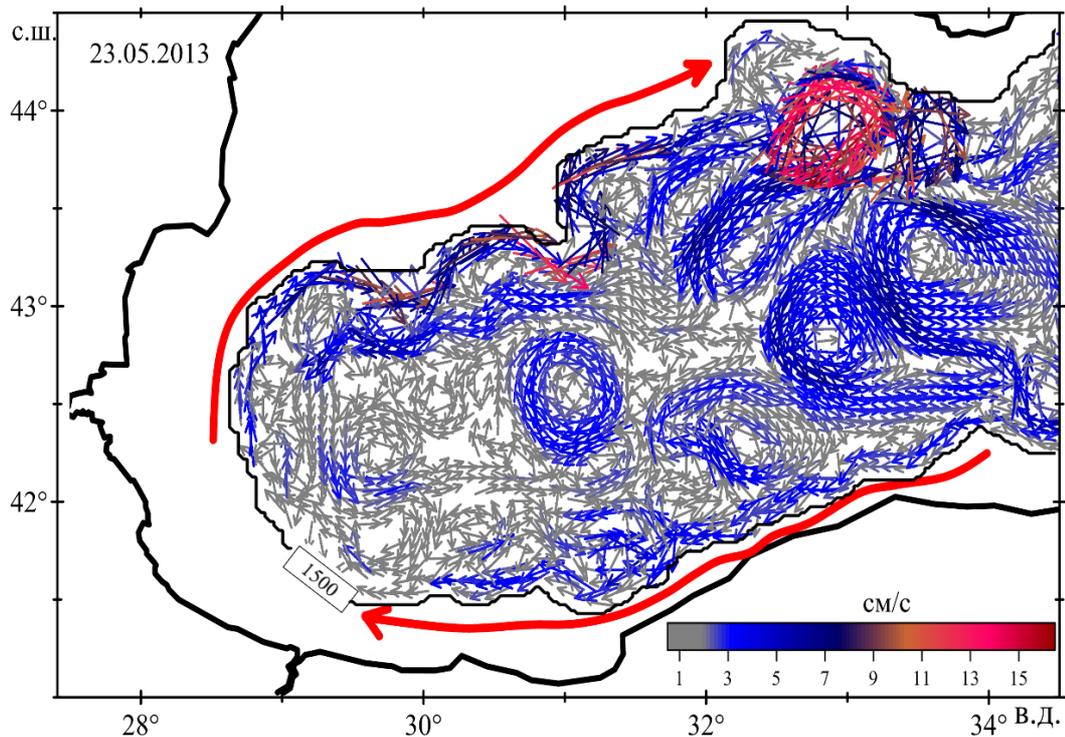


Рисунок 3.5 – Поле течений в западной части Черного моря 23.05.2013 на горизонте 1500 м. АЦТ продублированы дополнительными красными стрелками

В центральной и восточной абиссальной части бассейна формируются вихри, которые прослеживаются от нижней границы основного пикноклина до дна, сохраняя свою структуру с глубиной (Рисунок 3.6). Значения скорости в таких глубоководных вихрях могут достигать 20 см/с, в среднем составляя 5–8 см/с. В течение нескольких месяцев своего существования вихри трансформируются и смещаются преимущественно в западном направлении.

Максимальные значения скорости на глубинных горизонтах достигаются именно в подобных вихрях центральной абиссальной части бассейна, а также в районах Севастопольского и Батумского антициклонов, в отличие от верхнего

слоя моря, где максимальные значения часто определяются в прибрежных антициклонических вихрях, образующихся между ОЧТ и берегом [149].

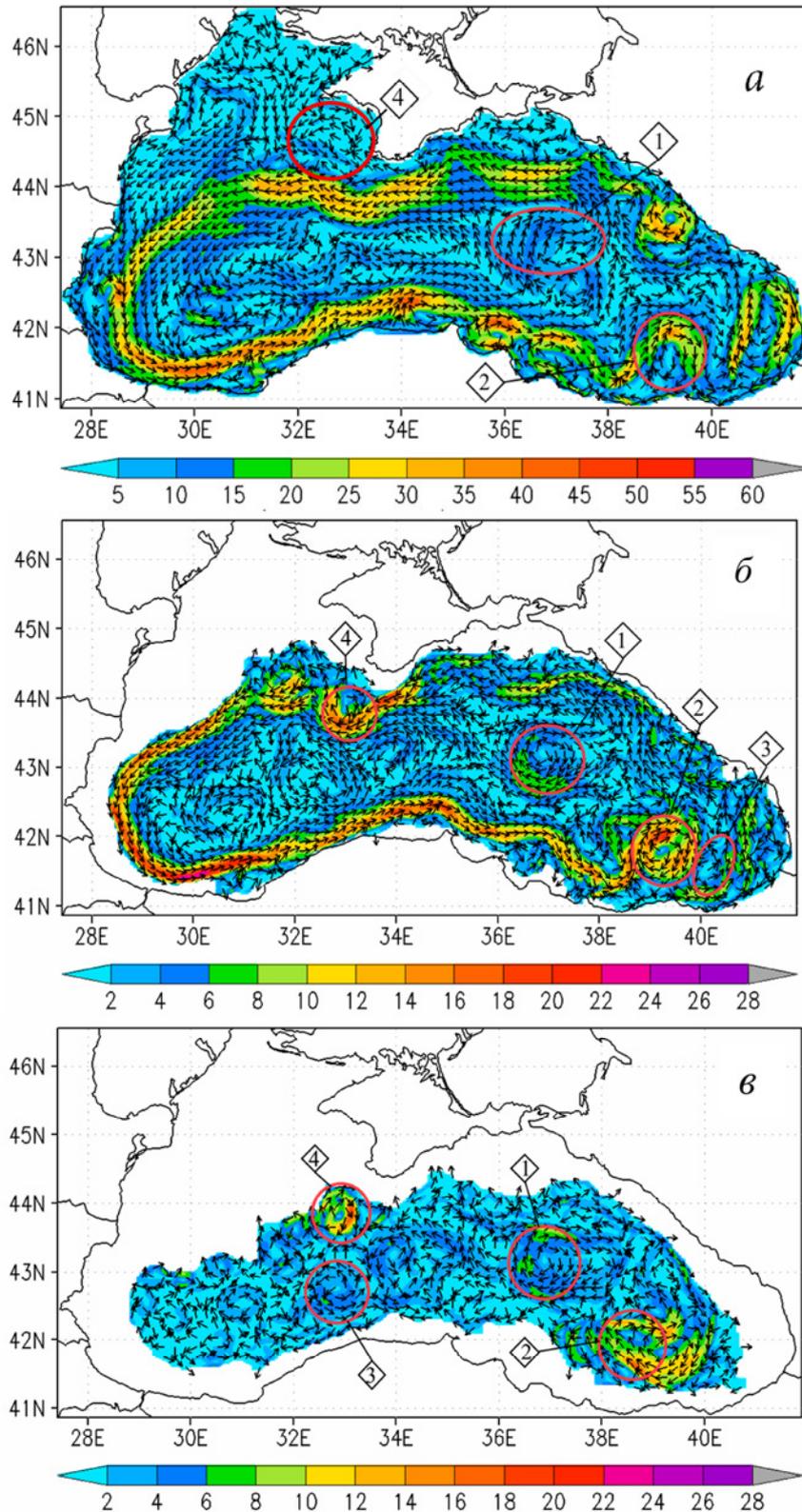


Рисунок 3.6 – Поле течений 26.06.2013 г.: *a* – на горизонте 5 м, *б* – на горизонте 300 м, *в* – на горизонте 1700 м

3.4 Особенности глубоководных течений Черного моря по данным многолетнего ретроспективного анализа

3.4.1 Используемые расчетные данные. Для подтверждения наличия обнаруженных особенностей глубоководных течений на длительных временных интервалах были рассмотрены результаты многолетнего ретроспективного анализа (реанализа) гидрофизических полей Черного моря, когда расчет проводится за прошедшие периоды с учетом произведенных в это время натурных наблюдений.

Результаты реанализа активно используются для исследования внутригодовой и межгодовой изменчивости динамики Черного моря. С помощью модели МГИ был проведен ряд таких работ, однако детальное исследование гидрофизических полей на основе полученных данных проводилось главным образом для верхнего слоя моря [100, 171, 172, 186]. Лишь в работе [173] были опубликованы материалы касательно динамики глубинных слоев. В данном подразделе основное внимание концентрируется на изучении особенностей глубоководной циркуляции Черного моря на основе результатов 21-летнего реанализа гидрофизических полей, полученных В.Л. Дорофеевым, Л.И. Сухих [171] в рамках проекта *MyOcean* [86, 170].

Исследуются результаты реанализа гидрофизических полей Черного моря за период 1992–2012 гг. [171], проведенного на основе модели МГИ. Представим наиболее важные особенности проведенного расчета. Так, при проведении реанализа на поверхности моря использован атмосферный форсинг ERA-Interim [165], выполнялось усвоение спутниковых данных SST и аномалии уровня моря. На горизонтах 200 м и более средние по глубине температура и соленость корректировались в соответствии со среднегодовыми профилями, рассчитанными на основе полученных в рассматриваемый период данных контактных измерений, на которые затем налагался климатический сезонный ход [171]. Исследуемый в данной работе массив расчетных данных реанализа содержит результаты моделирования (среднесуточные поля) приведенного уровня моря, трехмерных полей температуры, солености и составляющих скорости течений на 38 z -уровнях от поверхности

до дна. Разрешение в горизонтальных направлениях составляет 4,8 км, дискретность записи данных по времени – каждые сутки для периода 1992–2012 гг.

3.4.2 Анализ среднесуточных и среднемноголетних полей течений. Проводится анализ среднесуточных и осредненных для каждого месяца полей скорости течений за весь расчетный период (21 год), в ходе которого устанавливаются наиболее характерные особенности глубоководной циркуляции Черного моря.

Построение *ежесуточных* карт течений на горизонтах под основным пикноклином позволило визуализировать и оценить изменчивую картину глубоководных течений в целом по бассейну. Установлено, что абсолютные значения скоростей на горизонтах более 300 м редко превышают 5 см/с, наиболее характерные значения составляют 1–3 см/с. Максимальные величины скоростей достигаются в вихревых структурах и течениях и составляют около 10 см/с (единично – до 20–25 см/с за весь рассмотренный период). На горизонте 300 м прослеживаются особенности динамики, характерные для верхнего слоя моря. Так, на западной границе бассейна в холодное время года отмечается нижняя часть ОЧТ со скоростями до 10 см/с. Севастопольский, Батумский, Кавказский и другие квазистационарные антициклоны также обнаруживаются на данном горизонте в периоды их наибольшего развития на поверхности, скорости в них достигают 5–7 см/с. На нижележащих горизонтах циркуляция также носит циклонический характер, а основными динамическими структурами являются мезомасштабные вихри горизонтальными размерами до 200–250 км и узкие течения вблизи твердых границ бассейна, продолжительность которых составляет от нескольких дней до нескольких недель.

Изучение *среднемесячных* значений скорости за весь 21-летний период позволило выявить следующие особенности годового цикла глубоководной циркуляции.

На горизонте 300 м зимой самые высокие значения скорости (5–7 см/с) достигаются в течении, формирующемся в районе Босфора и следующем на восток вдоль Анатолийского побережья. Около 34° Е из-за особенностей рельефа дна оно поворачивает к центру бассейна, формируя грибовидную вихревую структуру. В

течение осени и зимы (с октября по март) на данном горизонте поле скорости в целом относительно гладкое и других мезомасштабных структур в средних полях не отмечается. В марте–апреле развиваются Севастопольский и Батумский антициклоны. Их размер и скорости здесь в несколько раз меньше, чем на поверхности. С марта появляется АЦТ вдоль свала глубин в районе северокавказского побережья, наибольшее его развитие отмечается в июне (Рисунок 3.7 (а)).

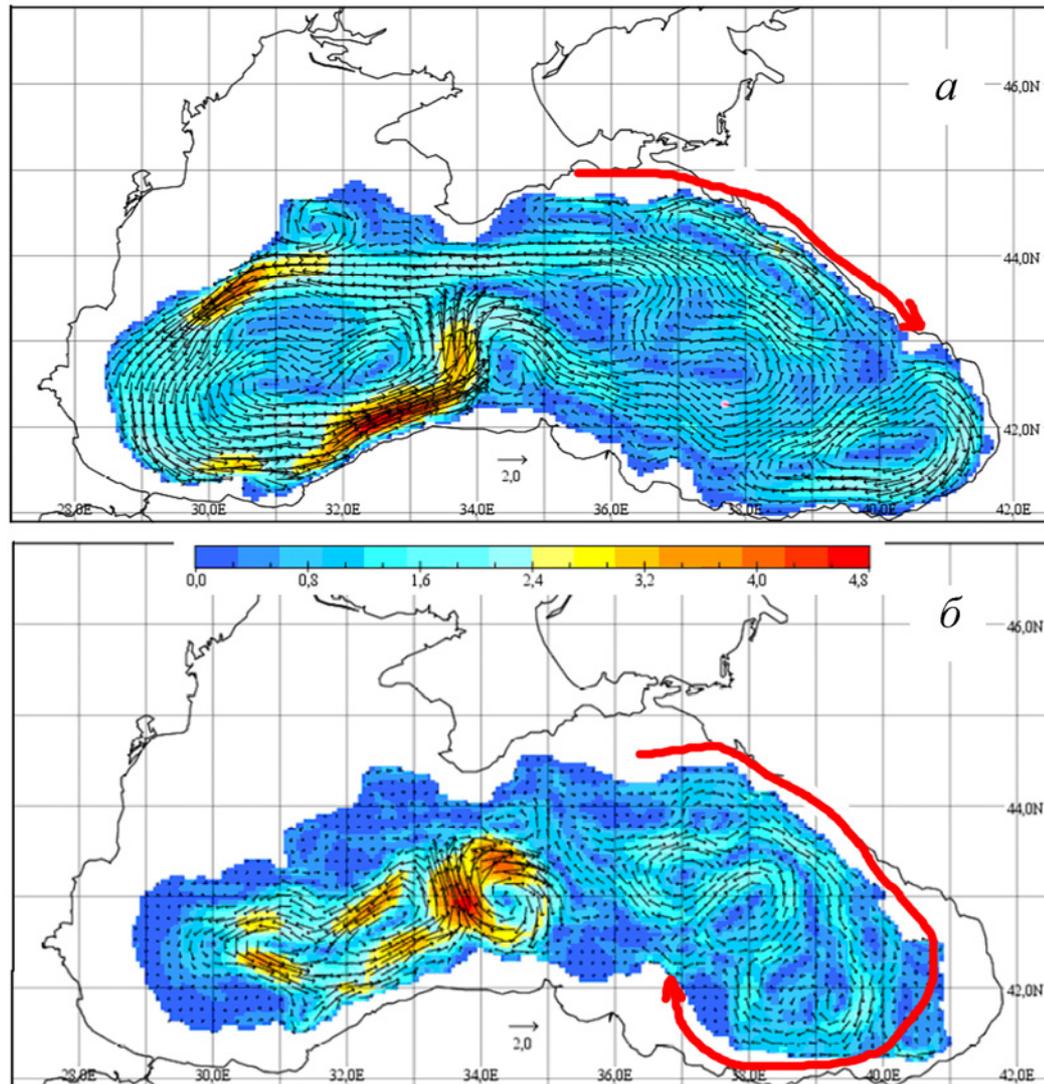


Рисунок 3.7 – Поле среднемесячной скорости (июнь): *а* – на горизонте 300 м, *б* – на горизонте 1500 м. АЦТ продублированы красными стрелками

В других частях моря течения вдоль континентального склона имеют циклоническую направленность. На периферии бассейна значения средних скоростей составляют менее 2 см/с. На глубине 300 м в средних полях время жизни Се-

востопольского антициклона ограничено июлем, а Батумский антициклон диссипирует во второй половине сентября. Скорости в обоих вихрях не превышают 3 см/с. В июле отмечается формирование двух антициклонов в районе побережья Кавказа. В августе восточная и западная части моря охвачены циклоническими круговоротами, которые характерны для верхнего слоя моря, вблизи юго-восточного побережья Крыма образуется антициклонический вихрь.

На горизонте 500 м основные черты внутригодовой изменчивости течений таковы. Вихри, главным образом циклонические, формируются в центральной абиссальной части бассейна и смещаются в западном направлении, преодолевая центральную часть моря с востока на запад за несколько месяцев. В таких структурах достигается максимумы среднемноголетней скорости на горизонте – около 5 см/с при фоновых значениях ниже 2 см/с. Такой же характер поля скорости в абиссальной части моря можно проследить и на больших глубинах.

На горизонте 500 м появление вихрей Севастопольского и Батумского антициклонов запаздывает примерно на месяц относительно их образования на горизонте 300 м (в апреле появляется Батумский, в июне – Севастопольский). Также в июне обнаруживается АЦТ, распространяющееся вдоль северо-восточной части континентального склона.

Подобно ситуации на горизонте 300 м, на глубине 500 м в мае течение вдоль западной части Анатолийского побережья разворачивается к центру моря с образованием грибовидной вихревой структуры. К июлю антициклонический вихрь сохраняет свои размеры и значения скорости до 3 см/с, а циклон ослабевает. Севастопольский антициклон диссипирует к августу, Батумский – во второй половине сентября. Как и на горизонте 300 м, осенью и зимой на периферии вдоль континентального склона значительных вихревых структур в средних полях не прослеживается, поле скорости относительно гладкое, наблюдается общая циклоническая циркуляция со скоростями до 2 см/с.

На горизонте 1000 м осенью и зимой ситуация сходна с обозначенной для горизонтов 300–500 м: на периферии бассейна отдельных вихрей не наблюдается, но мезомасштабные циклонические вихри формируются в центральной части мо-

ря и затем смещаются на запад. Имеются, однако, и некоторые отличия. Там, где в верхнем слое расположен Севастопольский антициклон, на глубине 1000 м в конце зимы – начале весны определяются несколько циклонических образований с довольно низкими скоростями (~ 1 см/с) и горизонтальными размерами от 15 до 30 км. Подобный эффект формирования не одного, а нескольких вихрей, в том числе циклонических, в нижней части материкового склона уже был выявлен при рассмотрении климатических полей (Раздел 2) и результатов расчетов на мелкой сетке 1,6 км (п. 3.3).

С апреля по июль вдоль свала глубин от Геленджика на юго-восток в средних полях обнаруживается АЦТ со скоростью 1,5–2 см/с. Максимумы скорости на горизонте 1000 м достигаются в циклонических вихрях в центральной части моря [51]. В мае в абиссальной области, между 34° Е и 35° Е, образуется антициклонический вихрь. Его скорости около 2 см/с, он существует всего 2–3 месяца в году, и к августу в этом районе уже формируется новый циклон. Все вихревые структуры со временем смещаются на запад.

На горизонтах 1500 и 2000 м средние скорости не превышают 1–2 см/с. В центральной абиссальной части моря присутствуют циклонические вихри, обнаруженные ранее на горизонтах 500 и 1000 м. Орбитальные скорости в этих циклонах достигают 4 см/с. В мае на горизонте 1500 м и в первой половине июня – на горизонте 2000 м в центральной части бассейна начинает формироваться антициклон, который разрушается к августу. Летом (июнь, июль) в восточной части моря преобладает антициклоническая циркуляция (Рисунок 3.7 (б)), формируется АЦТ вдоль северокавказского континентального склона со средней скоростью около 2 см/с. К осени количество отдельных динамических структур по периферии бассейна (вихрей, течений) в целом значительно уменьшается.

Итак, согласно данным многолетнего реанализа, средние скорости течений в глубинных слоях довольно низкие (до 2 см/с), а общая схема циркуляции является циклонической. Поле скорости на горизонте 300 м еще содержит отдельные особенности, характерные для верхнего слоя.

В средних полях существуют мезомасштабные динамические структуры с характерными скоростями в 2–5 раз выше фоновых. Это в основном циклонические вихри, которые четко определяются на горизонтах 500–2100 м. Они формируются в центральной абиссальной области и смещаются преимущественно в западном направлении из центра восточной половины моря (примерно между 34° и 38° в.д.). Максимумы среднесуточной скорости до 20 см/с на глубоководных горизонтах достигаются именно в таких вихрях, в отличие от верхнего слоя, где наиболее активная динамика характерна для прибрежных областей [149].

На периферии бассейна вдоль континентального склона обнаруживаются преимущественно антициклонические вихри с более низкими – относительно центральных областей – скоростями, формирующиеся весной и диссипирующие в конце лета. Расположение и пространственная структура этих вихрей не всегда соответствуют структурам верхнего слоя, на их динамике существенно сказываются особенности рельефа дна.

Исследование среднемесячных скоростей, полученных по данным многолетнего реанализа, позволило подтвердить наличие АЦТ, распространяющихся вдоль континентального склона в районе северокавказского побережья. В среднемесячных полях оно периодически определяется на глубинах более 300 м в весенне-летний период. С марта оно обнаруживается на глубине 300–500 м, с мая – на горизонте 1000 м, а в июне – и на 1500 м. В самой нижней части континентального склона (на глубинах более 1700 м) в средних полях это течение отсутствует.

3.5 Влияние экстремального атмосферного воздействия на глубоководную циркуляцию Черного моря (на примере квазитропического циклона)

3.5.1 Квазитропический циклон в атмосфере над Черным морем. Ранее в диссертационной работе анализировались поля течений Черного моря, построенные с использованием в численной модели климатического, а также реального атмосферного воздействия для стандартных синоптических ситуаций, характеризующихся относительно плавными изменениями в поле ветра. В данном подраз-

деле представлен анализ результатов расчета гидрофизических полей Черного моря при аномальных ветровых условиях – воздействии на море нетипичного для черноморского региона атмосферного вихря с характеристиками тропического циклона (далее – квазитропический циклон). Формирование и развитие особенностей трехмерной структуры гидрофизических полей Черного моря под влиянием такого редкого атмосферного образования, каким являлся для черноморского региона квазитропический циклон 25–29 сентября 2005 г., ранее не анализировалось. Особое внимание уделяется изучению реакции системы глубоководных течений на экстремальное ветровое воздействие.

Наблюдение и численное моделирование сложившейся в конце сентября 2005 г. атмосферной ситуации было представлено в работах [67, 68, 158]. Атмосферный вихрь был довольно компактен – характеризовался относительно небольшими горизонтальными размерами (радиус порядка 100 км) и значительной скоростью ветра (до 25–30 м/с), его эволюция характеризовалась следующими стадиями [67].

Начальная стадия развития атмосферного циклона – с 0 ч 25 сентября до 12 ч 26 сентября, при которой его радиус составлял 100–115 км, а максимальная скорость приводного ветра достигала 15 м/с. В горизонтальной структуре циклона наблюдалась сильная асимметрия с отчетливо выраженными спиральными рукавами неправильной формы.

На второй стадии (с 12 ч 26 сентября до 12 ч 27 сентября) происходило быстрое развитие циклона, когда скорость ветра достигла 24 м/с, а радиус уменьшился до 65 км. Он принял осесимметричную форму.

На третьей стадии (12 ч 27 сентября – 12 ч 28 сентября) циклон сохранял квазистационарный характер, имел практически круговую форму с радиусом 65 км и усилился: скорость ветра в циклоне превышала 30 м/с. На Рисунке 3.8 приведено поле ветра для периода наибольшего развития квазитропического циклона [68, 35].

На четвертой, последней стадии – с 12 ч 28 сентября до 12 ч 29 сентября – атмосферный вихрь быстро ослабевал, начал приближаться к берегу и вышел за пределы акватории Черного моря в районе Анатолийского побережья.

Полученные в результате моделирования атмосферные поля [68] используются в качестве краевых условий на границе атмосфера–море для моделирования состояния морской среды. Расчет выполняется на период 5 суток – соответственно времени воздействия квазитропического циклона на морскую поверхность.

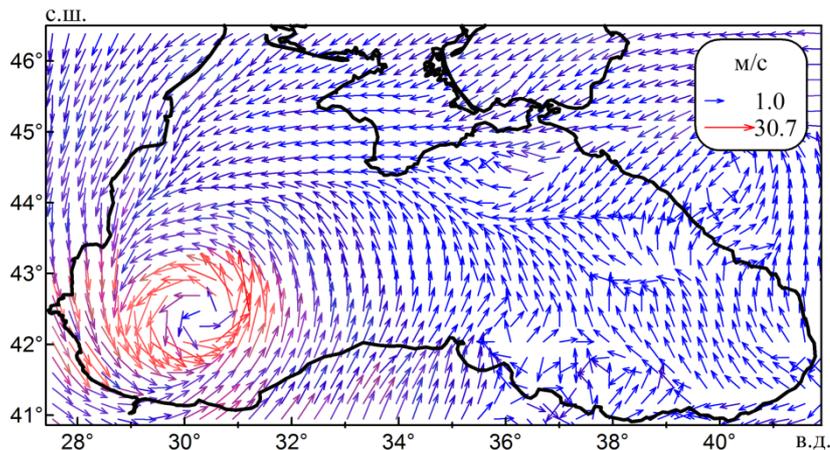


Рисунок 3.8 – Квазитропический циклон над Черным морем: поле скорости ветра на 8 ч 0 мин 28.09.2005

3.5.2 Параметры модели. Проводится прогностический расчет гидрофизических полей Черного по схеме, представленной в п. 3.1, с разрешением 5 км по горизонтали и на 45 горизонтах по вертикали. Шаг по времени равен 1 мин. Значение коэффициента горизонтального обмена импульсом составляет $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^4/\text{с}$, коэффициент горизонтальной диффузии в уравнениях адвекции-диффузии тепла и соли равен $10^{16} \text{ см}^4/\text{с}$. Для вычисления коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по вертикали применяется модель турбулентности Меллора–Ямады 2.5 [197]. Касательные напряжения трения ветра, воспроизведенные в работе [68] на основе региональной атмосферной модели MM5 [211], задаются на поверхности моря каждый час (с 0 ч 25 сентября по 12 ч 29 сентября) и линейно интерполируются на каждом шаге по времени. Общее время счета составило 5 суток (25–29 сентября 2005 г) [35].

3.5.3 Результаты расчета гидрофизических полей. По результатам численного эксперимента, на начальной стадии развития квазитропического циклона (25–26 сентября 2005 г.) в западной части Черного моря наблюдалось усиление имеющегося циклонического круговорота в море и формирование погранслоя у западного побережья, где значения возвышения уровня достигли 22 см. В зону циклонического вращения были вовлечены воды ОЧТ начиная от болгарского побережья на северо-западе до центральной части Анатолийского побережья на юго-востоке.

Дальнейшее усиление ветра привело к значительной интенсификации течений в западной части бассейна и к формированию мощного циклонического вихря в море, в центре которого понижение уровня достигало 30 см (Рисунок 3.9), а скорости течений в поверхностном слое превысили 160 см/с [35].

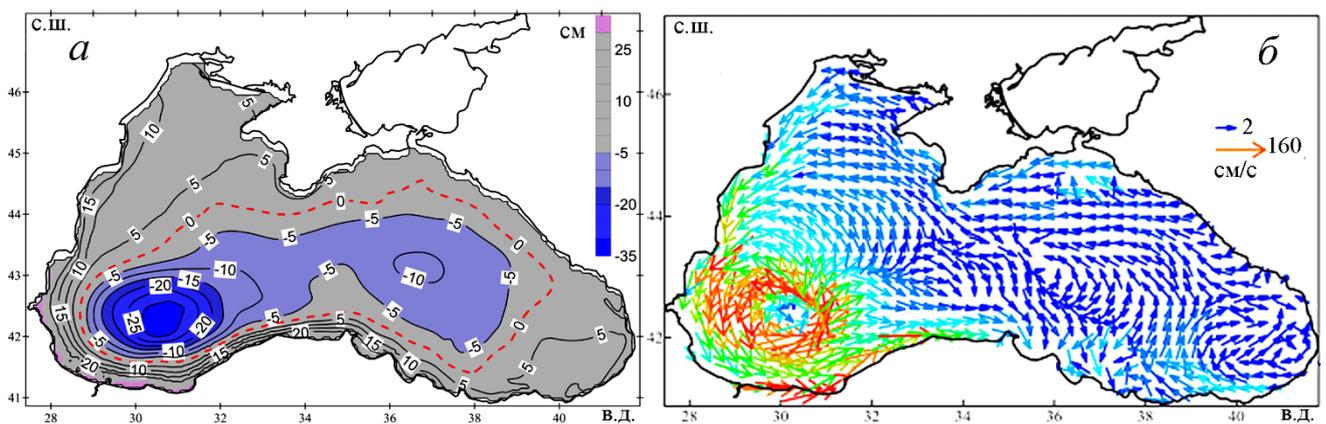


Рисунок 3.9 – Среднесуточные поля 28.09.2005:

a – уровень, *б* – течения на горизонте 5 м

В западной части моря значительно усилилось ОЧТ, вдоль границы бассейна сохранялся ярко выраженный погранслой, в то время как мощность восточного циклонического круговорота в целом существенно не изменилась. В центре западной части моря значительно усилился процесс подъема глубинных вод.

Период 25–26 сентября характеризовался развитием апвеллинга под центральной частью атмосферного вихря. Резкое усиление атмосферного циклона в период с 12 ч 26 сентября до 12 ч 27 сентября привело к тому, что в области раз-

вивающегося циклонического вихря в море слой теплых приповерхностных вод уменьшил свою толщину до 20–25 м, произошел разрыв ХПС. Интенсивный процесс диффузии и увеличение области разрыва продолжись и 28 сентября. Наряду с подъемом вод имело место мощное перемешивание, которое привело к попаданию на поверхность моря вод, находившихся под ХПС до начала действия атмосферного циклона [35].

Вследствие процессов сильной диффузии в поверхностном слое и подъема вод, к 27 сентября в центре циклонического вихря в море на глубинах 20–40 м сформировался резкий халоклин. Дальнейший процесс диффузии привел к тому, что к 29 сентября на поверхности моря образовалась область вод с соленостью более 19,5 ‰, что соответствует климатической солености вод на глубинах 70–80 м. Процесс подъема холодных вод в центре вихря сопровождался опусканием теплых вод по его периферии со скоростью примерно 10 м/сут. Толщина верхнего перемешанного слоя на периферии циклона увеличилась до 60 м. Рисунок 3.10 демонстрирует поля температуры и солености на зональном разрезе, проходящем через центр циклона, по состоянию на 29 сентября.

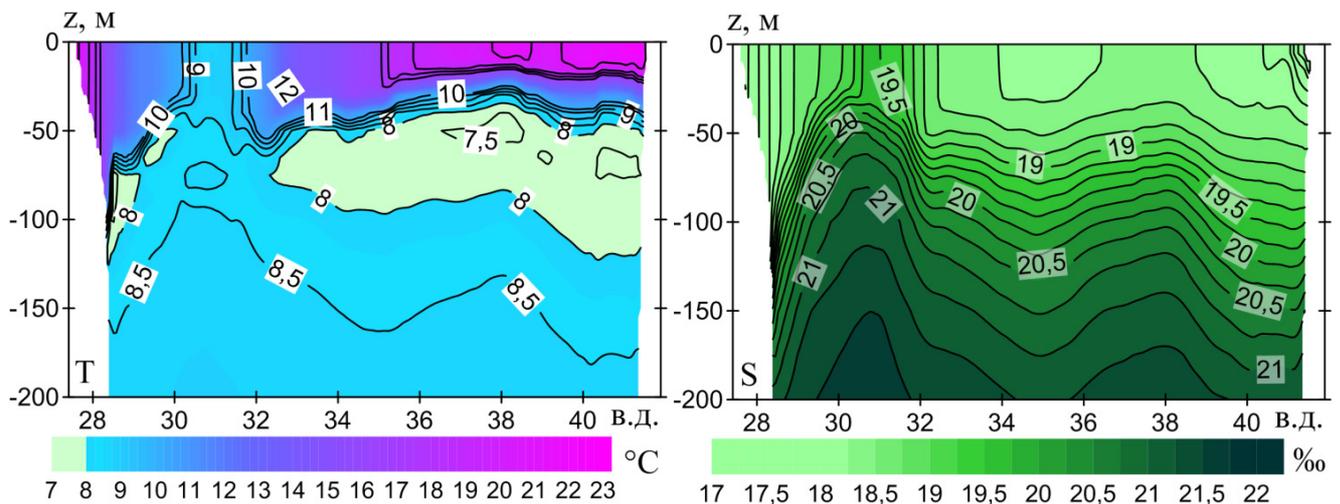


Рисунок 3.10 – Поля температуры и солености 29.09.2005 (разрез 42°с.ш.)

Данные зондирования температуры поверхности моря со спутника (SST) также свидетельствуют о формировании области аномально холодных вод, соответствующей воспроизведенной в расчете (Рисунок 3.11). Область вод с темпера-

турой в центре ниже $+10^{\circ}\text{C}$ наблюдалась в зоне действия атмосферного вихря 28–29 сентября и сохраняла свое местоположение ко времени выхода циклона за пределы Черного моря [35, 40].

Получить информацию о состоянии морской среды контактными методами во время прохождения квазитропического циклона не представлялось возможным. Сложная штормовая ситуация, вызванная циклоном, привела к приостановке навигации в юго-восточной части Черного моря на несколько суток. Поэтому сопоставить результаты численных экспериментов для этого периода можно только с редкими данными спутниковых наблюдений [134]. Тем не менее, в результате расчета получено качественное соответствие наблюдаемого и модельного поля температуры и воспроизведена главная его особенность – область холодных вод в западной части моря [35].

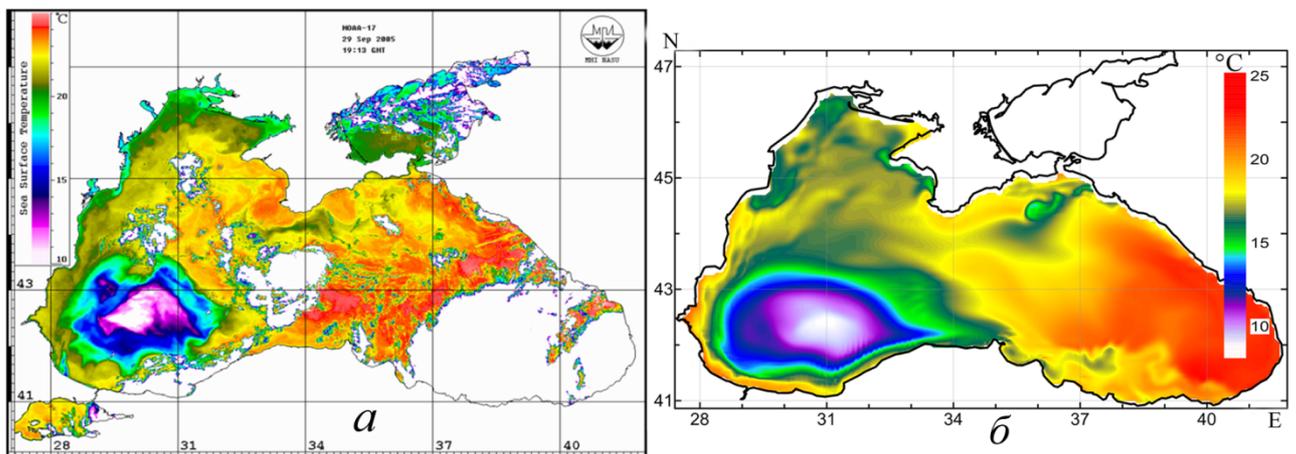


Рисунок 3.11 – Температура поверхности моря 29.09.2005: *а* – по измерениям SST со спутника NOAA-17 [134], *б* – по данным расчета (горизонт 5 м)

Воздействие атмосферного циклона привело к интенсивным процессам перемешивания в верхнем слое моря и подъему глубинных вод. Так, 25–26 сентября скорость течений в зоне действия циклона возросла и на поверхности моря достигла 110 см/с . В последующий период по 28 сентября скорости течений усиливались на всех горизонтах (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Максимумы среднесуточной скорости течений (см/с) в период действия циклона. Серым цветом выделен максимум на горизонте за весь период

Горизонт	Дата				
	25.09.05	26.09.05	27.09.05	28.09.05	29.09.05
2,5 м	74	110,5	142	151	119
200 м	12	17	25	40	41
500 м	4	6	10	15	13
700 м	3	4	8	16	15
1000 м	3	4	9	19,5	18
1200 м	3	4	11	23	20
1300 м	3	5	11	15,5	22
1500 м	3	5	11	14,5	21
1700 м	3	4	10	17	22
2000 м	3	3	5,5	12	12,5

Своей наибольшей интенсивности атмосферный циклон достиг 27–28 сентября, приняв при этом осесимметричную форму, чему соответствовала и структура течений (Рисунок 3.9). Максимальная скорость на поверхности моря в этот период превысила 150 см/с. Наибольшие скорости достигались в сформировавшемся вдоль юго-западного побережья узком струйном течении и в центральной части вихревой структуры в море.

3.5.4 Влияние квазитропического циклона на глубоководные течения.

Воды Черного моря на больших глубинах также подверглись существенному влиянию квазитропического циклона. Вследствие распространения ветрового импульса вглубь моря скорости течений усиливались на всех горизонтах (Рисунок 3.12). В период 28–29 сентября скорости глубоководных течений в зоне действия циклона в 4–7 раз превышали климатические (Рисунок 3.13). Максимум скорости в глубинных слоях был достигнут 29 сентября и составил 22 см/с.

29 сентября, когда атмосферный циклон ослаб и стал покидать акваторию Черного моря, скорости течений на поверхности по сравнению с предыдущими сутками уменьшились примерно на 20%. На остальных горизонтах также нача-

лось постепенное снижение скорости течений, хотя максимумы скорости на глубинах более 1200 м 29 сентября даже несколько превышали значения в предыдущие сутки.

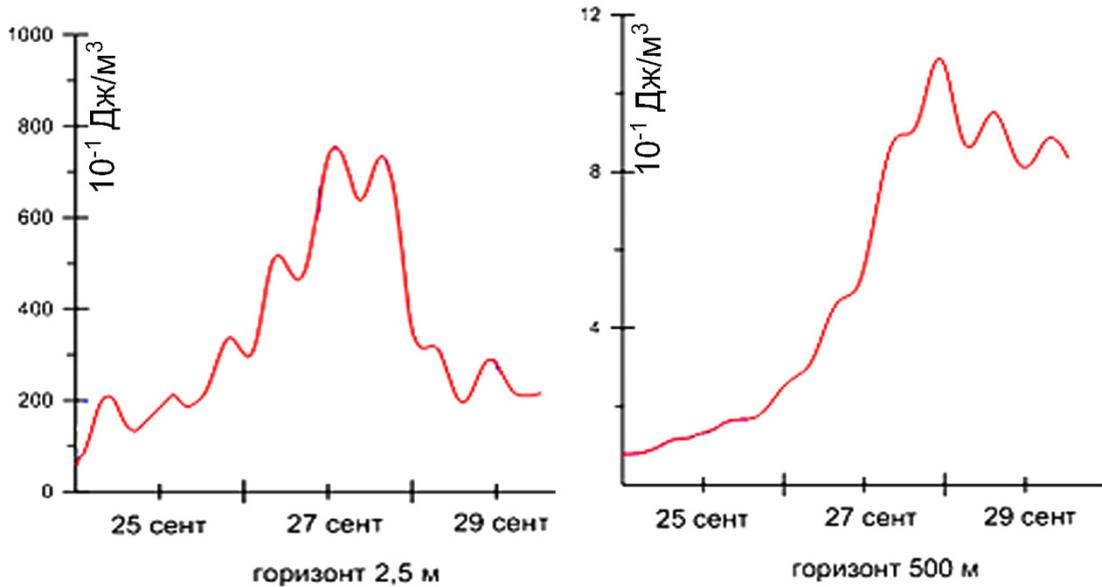


Рисунок 3.12 – Плотность средней кинетической энергии на горизонтах 2,5 м и 500 м в период воздействия на море квазитропического циклона

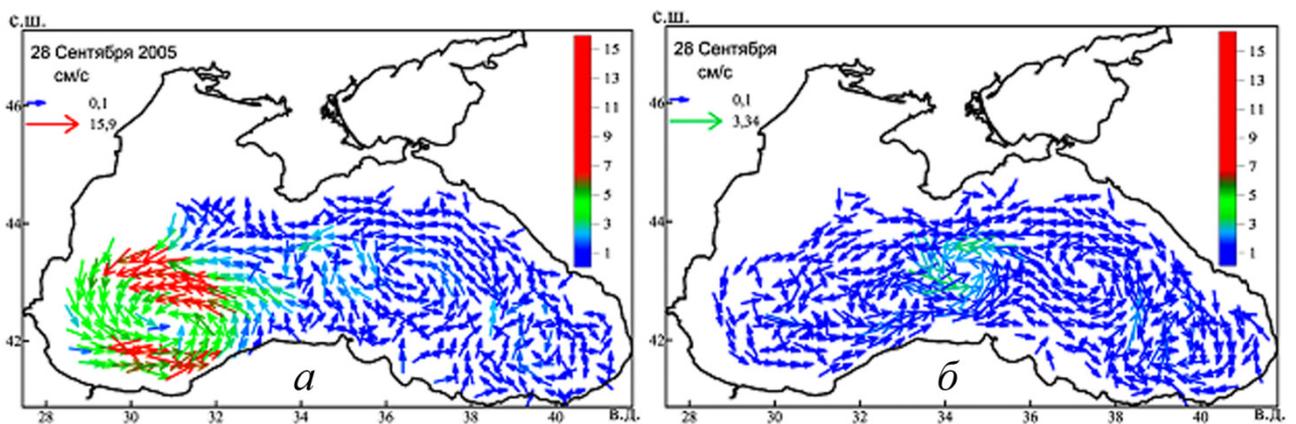


Рисунок 3.13 – Течения на горизонте 1000 м: *а* – среднесуточные 28.09.2009, *б* – климатические

Таким образом, моделирование отклика Черного моря на воздействие аномального для черноморского региона квазитропического циклона показало следующее. Структура сформировавшегося к 27–28 сентября вихря в море соответствовала форме атмосферного циклона. На протяжении всего периода интегриро-

вания поддерживались осесимметричная форма циклонического вихря в море и узкий струйный вид ОЧТ [35]. Ветровая энергия передавалась с поверхности в нижние слои моря и привела к усилению скоростей и трансформации структуры поля течений по всей глубине. Скорости в сформировавшемся циклоническом вихре на всех горизонтах были в несколько раз выше климатических и в период наибольшего развития вихря превышали 15–20 см/с.

В верхнем слое моря развивалось интенсивное перемешивание, мощный апвеллинг привел к выходу на поверхность вод ХПС. Качественные и количественные характеристики образовавшейся к 29 сентября аномалии температуры на поверхности соответствуют полученным спутниковым данным SST. Отметим также, что полученные для черноморского региона результаты соответствуют существующим теоретическим представлениям о генерации квазибаротропных океанских вихрей прямым атмосферным воздействием [78].

3.6 Сопоставление особенностей глубоководных течений Черного моря по результатам численного моделирования и данным натурных наблюдений

3.6.1 Сопоставление результатов численных экспериментов. В результате ряда численных экспериментов по моделированию динамики Черного моря, проведенных на основе модели МГИ, был получен большой объем данных, включающий трехмерные поля скорости от поверхности моря до дна. Расчеты были выполнены на основе одной численной модели, но с различным атмосферным форсингом, пространственным разрешением и схемами параметризации коэффициентов вертикального турбулентного обмена [119]. Численные эксперименты, результаты которых были рассмотрены выше, относились к одному из трех типов.

Первый – *климатический* – расчет динамики Черного моря на основе модели МГИ с климатическим атмосферным воздействием, ассимиляцией ГК данных о температуре и солености, параметризацией коэффициентов вертикального турбулентного обмена по схеме Пакановски–Филандера и горизонтальным разрешением 5 км (описание и анализ эксперимента представлены в Разделе 2). Основной

результат этого расчета – воспроизведение трехмерного поля течений Черного моря с учетом среднемноголетних данных измерений температуры и солености и проведенный анализ полученного поля на глубоководных горизонтах. В ходе изучения особенностей поля скорости было, в частности, установлено, что на горизонтах 300–1800 м периодически возникают АЦТ, распространяющиеся вдоль свала глубин, и наиболее часто они обнаруживаются в весенне-летний период в северо-восточной части моря. Наличие течений антициклонической направленности в глубинных слоях моря является, пожалуй, наиболее интересной особенностью поля скорости Черного моря, дискуссия о которой периодически возобновляется в связи со вновь получаемыми результатами как натурных наблюдений, так и модельных расчетов.

Во второй серии экспериментов – *прогностического* типа – было учтено реальное атмосферное воздействие, в качестве которого были использованы продукты специализированных атмосферных моделей. Коэффициенты вертикального турбулентного обмена вычислялись в этом случае в соответствии с моделью Меллора–Ямады 2.5 [197]. Пространственное разрешение по горизонтали было улучшено по сравнению с расчетом климатических полей и составило 1,6 км [119]. Ассимиляции трехмерных массивов температуры и солености, как это выполнялось в расчете климата моря, в прогностических экспериментах не предусмотрено. Результаты этой серии экспериментов представлены в Разделе 3 (п. 3.3). В прогностических численных экспериментах на всех горизонтах были выявлены мезомасштабные динамические образования, которые в климатическом эксперименте не были воспроизведены (Рисунок 3.14). Данный результат вполне объясним использованием в климатическом расчете более гладких атмосферных климатических полей и более грубого разрешения по пространству. По сравнению с климатическим расчетом, скорости воспроизведенных течений в глубинных слоях моря оказались выше, их средние значения составили 3–5 см/с, а максимальные величины достигали 15–20 см/с. Наибольшие средние скорости были характерны для мезомасштабных вихревых структур, где они составляли 5–8 см/с [127].

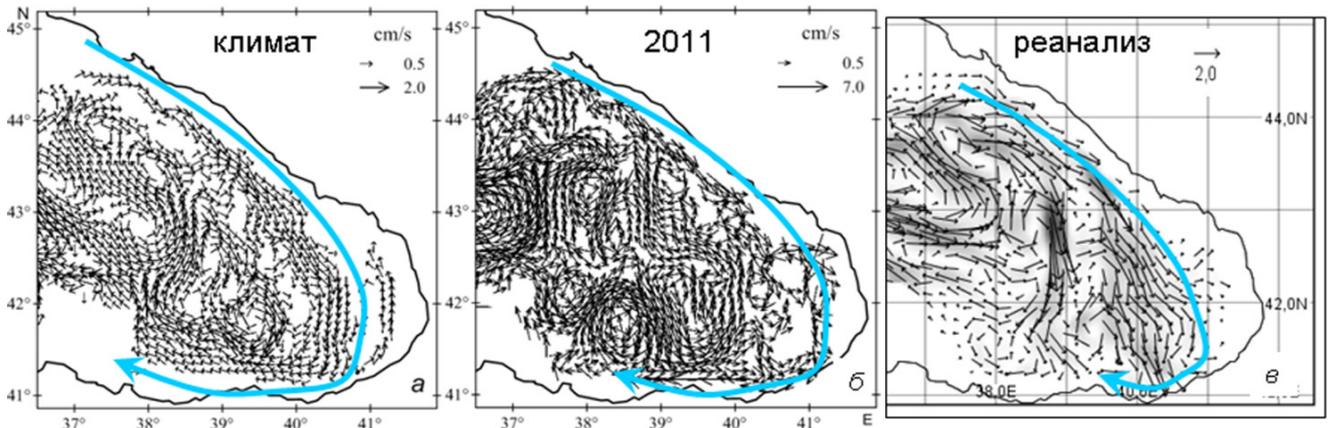


Рисунок 3.14 – Поле течений в восточной части Черного моря (11 апреля, горизонт 1100 м) по разным расчетным данным: *а* – климатический расчет, *б* – прогностический расчет на 2011 г., *в* – реанализ [171]

Анализ полей скоростей, полученных в прогностических экспериментах для разных лет, также показал квазипериодическое формирование АЦТ вдоль свала глубин, однако на больших по сравнению с расчетом климата горизонтах – 1000 м и глубже, в вышележащих слоях такие течения не образовывались. АЦТ существовали как в теплый, так и в холодный период года и формировались более узкими и интенсивными (скорости до 15–20 см/с, ширина от 5 до 12 км) по сравнению с климатическими.

Результаты экспериментов третьего из рассмотренных типов – многолетнего *ретроспективного анализа* гидрофизических полей Черного моря [171] (Раздел 3, п. 3.4) – также показали присутствие АЦТ в весенне-летний сезон. Однако все результаты реанализа были получены на сетке 5 км, и в среднесуточных полях наличие АЦТ не всегда определялось четко. Лучше всего такие течения прослеживались по среднемноголетним данным за июнь в восточной половине моря, при этом течения обнаруживались уже с нижней границы основного пикноклина (с горизонта 300 м), что соответствует результатам расчета климата моря. По данным ретроспективного анализа также подтверждены результаты предыдущих экспериментов, согласно которым фоновые значения среднемноголетних скоростей в глубинных слоях довольно низкие (до 2 см/с), а общая схема циркуляции является циклонической. В средних полях определяются также мезомасштабные

динамические структуры с характерными скоростями в 2–5 раз выше фоновых. Это в основном глубоководные циклонические вихри, которые прослеживаются в центральной абиссальной области и смещаются преимущественно в западном направлении из восточной половины моря.

3.6.2 Уточнение верхней границы течений антициклонической направленности. Поскольку относительно верхней границы АЦТ в экспериментах были получены неоднозначные результаты, для их уточнения были привлечены дополнительные данные. Рассмотрим для этого результаты еще одного реанализа гидрофизических полей Черного моря [144], выполненного по отличной от [171] схеме, но также на основе модели МГИ. Расчеты были проведены на сетке с шагом по горизонтали 5 км, по вертикали рассматривались 38 горизонтов. В качестве атмосферного форсинга использовались данные *ERA-Interim* [165]. В ходе моделирования проводилась ассимиляция трехмерных полей температуры и солености с использованием разработанного авторами субоптимального алгоритма адаптивной статистики [100], учитывающего ошибки измерений ассимилируемых параметров. Такая процедура позволила воспроизвести реалистичную изменчивость термохалинных характеристик в слое основного пикноклина, что представляет интерес для детальных исследований циркуляции на этих глубинах.

По данным реанализа с 1993 по 2002 гг. были построены карты течений и выбраны года, когда вдоль северокавказского побережья на нижней границе основного пикноклина обнаруживалось течение юго-восточного направления (АЦТ). Установлено, что такое течение появлялось не каждый год, но четко определялось в 1993, 1998, 1999 и 2001 гг. На Рисунке 3.15 представлены синхронизированные карты течений на горизонте 400 м, построенные на основе результатов реанализа (Рисунок 3.15 (а, б)) и расчета климата моря (Рисунок 3.15 (в, г)) [51].

По данным реанализа, АЦТ периодически наблюдалось с апреля по июль, его скорости составляли от 1,5 до 4 см/с, а ширина – 30–35 км. В климатическом расчете скорости АЦТ на горизонтах 300–500 м достигали 3,5 см/с, а ширина –

20 км [51]. Таким образом, данные ретроспективного анализа [144] также показали, что на нижней границе основного пикноклина возможно формирование АЦТ, распространяющихся вдоль северо-восточного свала глубин.

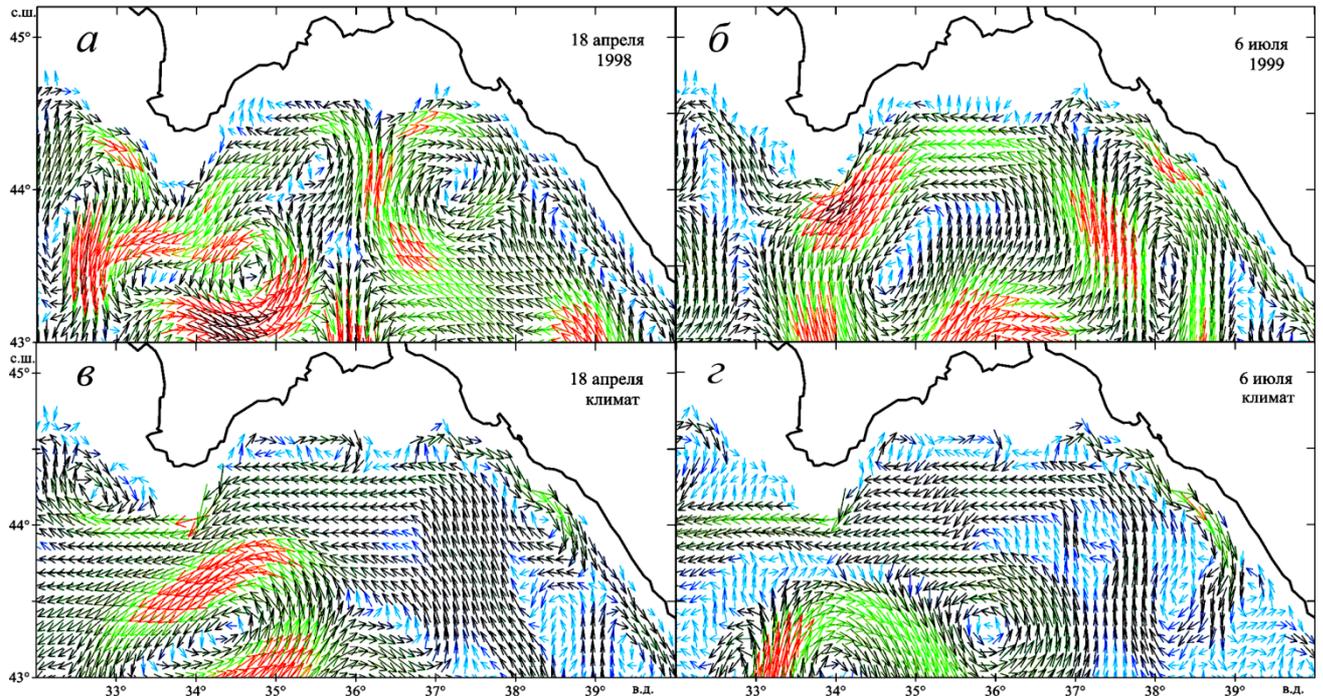


Рисунок 3.15 – Поле течений в северо-восточной части Черного моря на горизонте 400 м: по данным реанализа [144] 18 апреля 1998 г. (а), 6 июля 1999 г. (б) и климатические течения на те же даты (в, г)

Течения антициклонической направленности в нижней части пикноклина были обнаружены и по результатам другого расчета – следующей версии реанализа гидрофизических полей, разработанной В.Л. Дорофеевым, Л.И. Сухих [173] также с применением модели МГИ. Рисунок 3.16, приводимый здесь из указанной работы, демонстрирует среднемноголетнее поле восточной составляющей скорости течений на меридиональном разрезе 36° в.д. Из рисунка видно, что согласно этому расчету в восточной половине моря антициклонические течения определяются уже с глубины 250–300 м.

Итак, представленные результаты моделирования, а также данные наблюдений (буя ARGO № 6901833, дрейфовавшего на горизонте 200 м в северо-восточной части моря в 2016 – начале 2017 гг. (Рисунок 1.8) и расчеты скорости

по данным CTD–измерений на нормальных к берегу разрезах на полигоне в Геленджике (Рисунок 1.10)) можно отнести к свидетельствам в пользу наличия АЦТ в нижней части основного пикноклина.

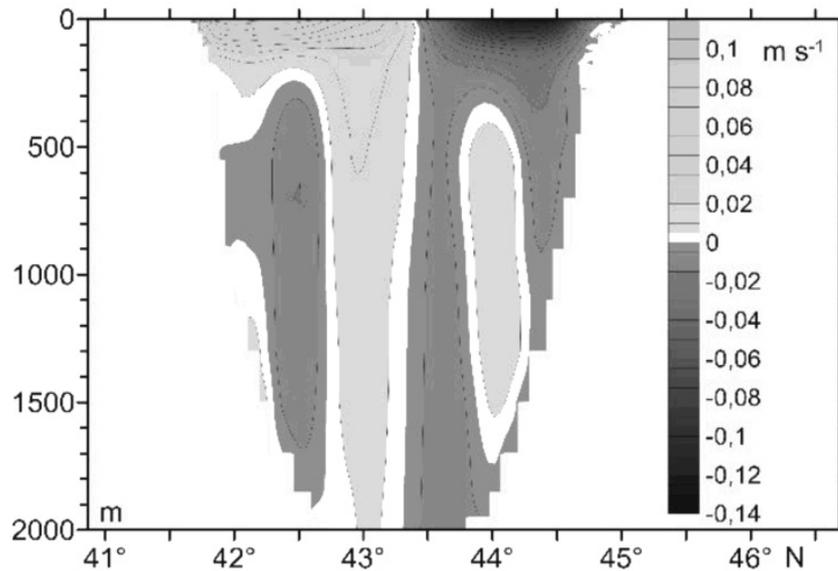


Рисунок 3.16 – Восточная составляющая скорости течений на меридиональном разрезе 36 °в.д. (из работы Дорофеев, Сухих [173, с. 7])

К особенностям трехмерного поля течений, полученных в результатах всех численных экспериментов, относятся, таким образом, отсутствие единого круговорота ОЧТ на горизонтах более 300 м, усиление глубоководных течений в зимний сезон (особенно выраженное у свала глубин в юго-западной части моря), наличие глубоких мезомасштабных вихрей в центральной абиссальной области и существенное влияние особенностей рельефа дна на эволюцию вихревых структур вблизи материкового склона, наиболее наглядное на примере Севастопольского антициклона. К важным особенностям поля течений под основным пикноклином нужно также отнести квазипериодическое формирование АЦТ, распространяющихся вдоль свала глубин и наиболее интенсивных в весенне-летний период. Определенные в результате анализа данных моделирования качественные и количественные особенности глубоководных течений сопоставим далее с данными натурных наблюдений.

3.6.3 Сопоставление результатов расчетов с данными зондирующего комплекса «Аквалог». Результаты численных расчетов согласуются также с опубликованными данными прямых измерений скорости течений в слое 0–1000 м, полученных с помощью наиболее современных акустических приборов определения скорости ADCP [138, 200] в отдельных районах Черного моря и выявивших наличие антициклонических особенностей в полях скорости. Наиболее ярким примером обнаружения АЦТ вдоль северо-восточного свала глубин является эксперимент, проведенный с использованием заякоренного зондирующего комплекса «Аквалог» в 2011 г. на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» [138].

Приведем сопоставление результатов моделирования течений с данными, полученными в ходе этого натурального эксперимента [119, 138] (их описание представлено в Разделе 1). Как было установлено в результате численных расчетов, наиболее часто АЦТ проявляются вдоль северо-восточной части материкового склона, где время их интенсификации составляет от одной до нескольких недель. По данным прогностических расчетов с учетом реального атмосферного воздействия они были обнаружены и в июне 2011 г. (Рисунок 3.3 (а)).

Результаты глубоководных измерений течений в точке ($44^{\circ}28'17''$ с.ш., $37^{\circ}56'14''$ в.д.) 17–19 июня 2011 г. с помощью ADCP, размещенного на «Аквалоге», показали наличие течений юго-восточной направленности на глубинах 500–950 м [138]. В ядре течения, располагавшемся на горизонтах 700–850 м (Рисунок 1.11), с помощью «Аквалога» была определена скорость около 3 см/с. Смена направления скорости начиналась на горизонтах 200–250 м, что близко к результатам моделирования климатических течений и расчету течений динамическим методом на основе STD–наблюдений на полигоне.

С целью сопоставить данные натуральных наблюдений скорости, полученные с помощью «Аквалога» [138], и результаты численного моделирования для 2011 г., были рассмотрены среднесуточные модельные поля, воспроизведенные с разрешением модели 1,6 км в ближайшей к месту наблюдений точке расчетной сетки с соответствующей глубиной ($44^{\circ}23'24''$ с.ш., $37^{\circ}51'36''$ в.д.). Профили составляю-

щих скорости течений по данным измерений и моделирования приведены на Рисунке 3.17, юго-восточные АЦТ соответствуют значениям ($U > 0$, $V < 0$).

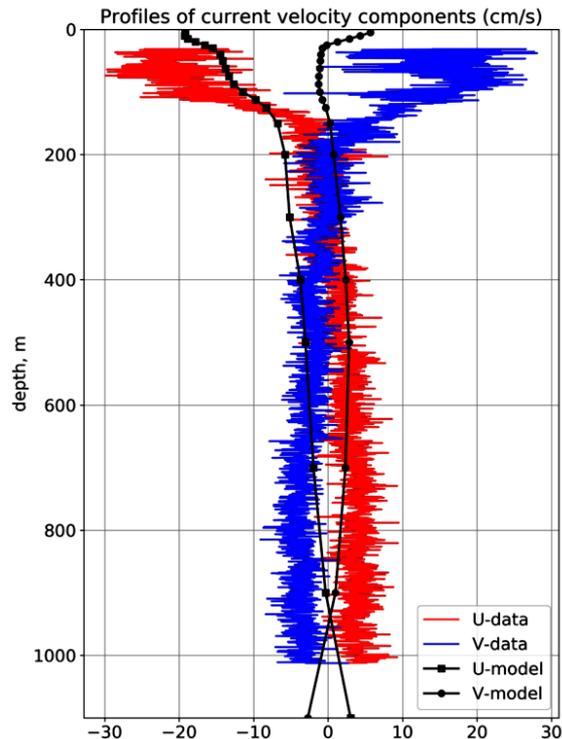


Рисунок 3.17 – Профили составляющих скорости течений (см/с) в период проведения измерений с помощью «Аквалаога» (17–19.06.2011 г.): цветные – по данным наблюдений [138], черные – по результатам моделирования

В указанном узле расчетной сетки также были построены диаграммы векторов скорости на разных горизонтах на весь 2011 г. (Рисунок 3.18). В период проведения натуральных измерений меридиональная составляющая рассчитанной скорости меняла знак на горизонте примерно 920 м, а зональная – на горизонте около 940 м. Глубже 940 м вектор скорости повернут на юго-восток, что соответствует данным измерений. Кроме того, как видно из Рисунка 3.18, в указанной точке смена направления течений на глубине 900 м происходит периодически, а на горизонте 1100 м (что примерно соответствует максимальной глубине места) течения то усиливаются до 7 см/с, то практически исчезают, но направлены преимущественно на юго-восток, что может свидетельствовать о наличии квазистационарных придонных течений антициклонической направленности. Придонные те-

чения в рассматриваемом районе, как показывает климатический расчет (Рисунок Б.8), действительно могут распространяться в антициклоническом направлении.

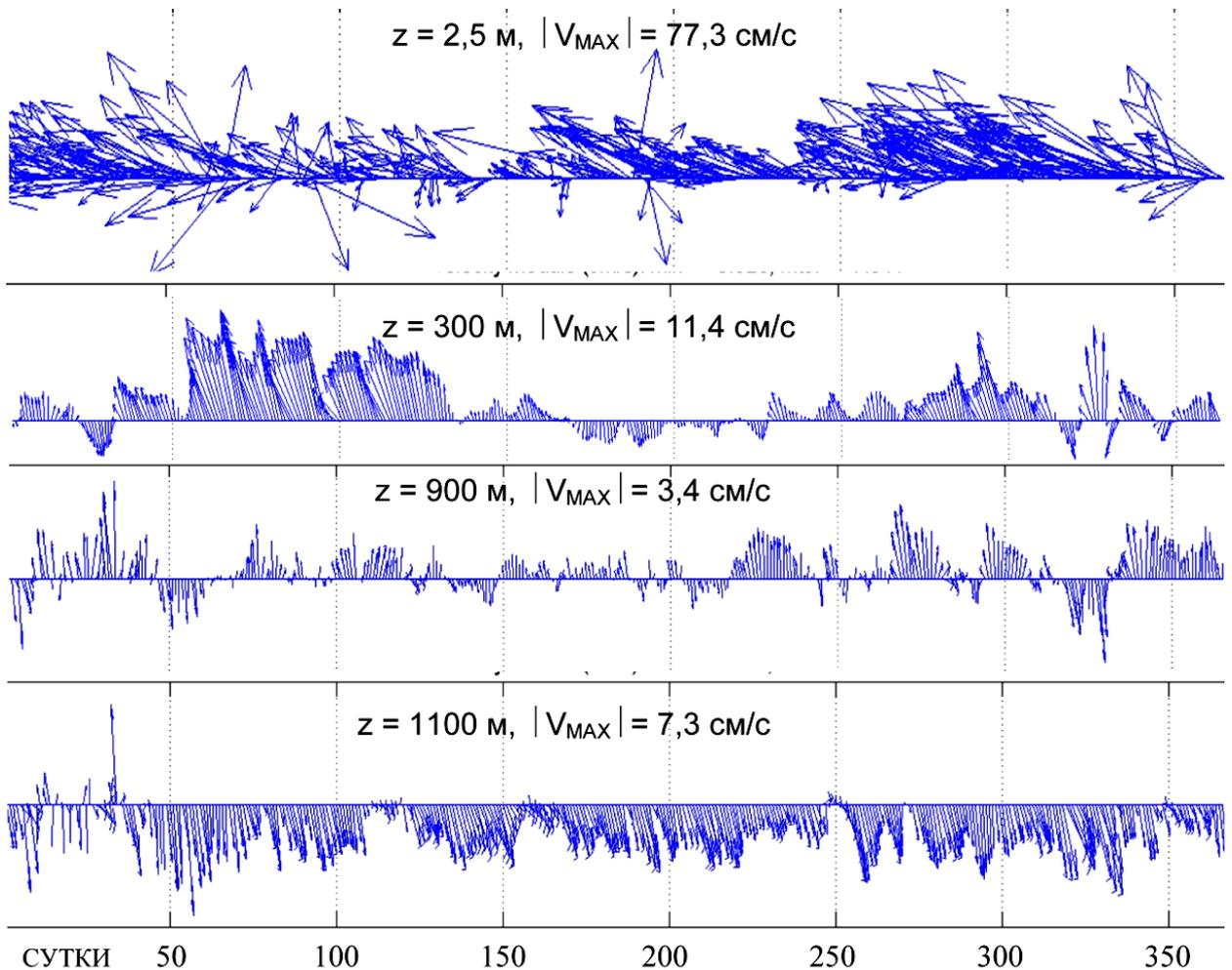


Рисунок 3.18 – Векторы скорости течений (см/с) в течение 2011 г. в точке (44 23'24" с.ш., 37 51'36" в.д.) на горизонтах 2,5 м; 300 м; 900 м и 1100 м

Можно отметить также, что в период проведения натурального эксперимента в указанной точке смена направления модельной скорости происходила на больших глубинах, чем по данным «Аквалоба», и только через несколько суток профиль модельных течений стал близким к наблюдаемому (Рисунок 3.19 (б, в)). Горизонтальная пунктирная линия на этом рисунке указывает глубину появления юго-восточных АЦТ ($U > 0, V < 0$) со скоростями от 2 до 4 см/с. Еще за несколько суток до старта натурального эксперимента смена знака модельной скорости происходила на меньшей глубине (560 м, Рисунок 3.19 (а)). Одно из возможных объяснений

таких отличий – несовпадение координат расчетного узла и точки проведения измерений вследствие несовершенства используемого при моделировании массива батиметрии. Также нужно принять во внимание высокую изменчивость скорости на горизонтах выше 1000 м в данном районе (Рисунок 3.18).

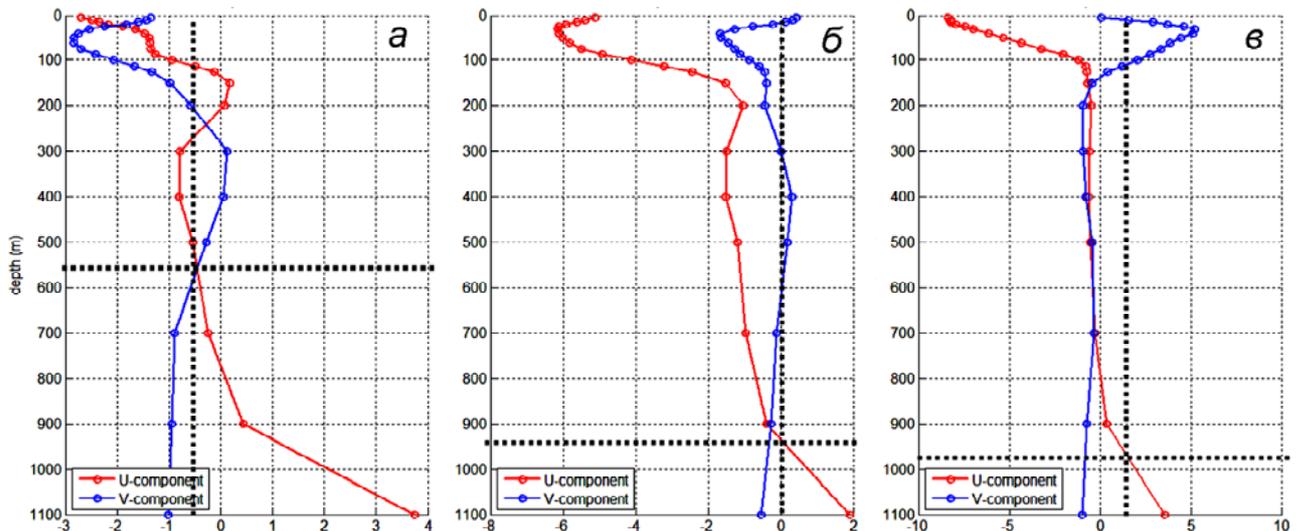


Рисунок 3.19 – Профили составляющих скорости течений (см/с) в точке (44 23'24" с.ш., 37 51'36" в.д.) по результатам моделирования на даты 16.06.2011 (а), 20.06.2011 (б) и 26.06.2011 (в)

Таким образом, численный эксперимент показал присутствие АЦТ со скоростями от 2 до 4 см/с в июне 2011 г. в районе полигона ИО РАН «Геленджик». Это согласуется с результатами инструментальных глубоководных наблюдений течений антициклонической направленности, проведенных в этот период с помощью зондирующего комплекса «Аквалог».

3.6.4 Сопоставление результатов численного моделирования с данными многолетних натуральных наблюдений. Приведем результаты сопоставления характеристик глубоководных течений, полученных во всех численных экспериментах, и выполненных оценок скорости по данным многолетних натуральных наблюдений (Раздел 1).

По всем рассмотренным наборам натуральных данных и результатам численных экспериментов, кроме модельных климатических, оценки величины средней скорости глубоководных течений в целом согласуются. Так, на горизонте 500 м

получен диапазон скоростей 3,5–4,5 см/с, на 750 м – от 2,5 до 4,0 см/с и на глубине 1500 м – от 3,0 до 3,5 см/с. Наибольшие различия в средних значениях наблюдаются на горизонте 1000 м, где найденные по разным источникам значения средней скорости составляют от 3 до 6 см/с. В прогностических расчетах получено наибольшее соответствие оценкам течений, выполненным на основе данных буев ARGO. На глубинах около 1000 м во всех модельных расчетах получены квазипериодические АЦТ, по данным наблюдений ARGO и БОД МГИ на этом горизонте в отдельные периоды достигаются высокие значения скоростей течений.

О наличии течения антициклонической направленности бассейнового масштаба (противотечения) прямых свидетельств не найдено, однако вдоль материкового склона обнаружены квазипериодические течения антициклонической направленности, наиболее часто формирующиеся вдоль северокавказского побережья в весенне-летний период.

Все проведенные численные эксперименты показали наличие квазипериодических глубоководных АЦТ. В климатическом расчете АЦТ в весенне-летний период охватывает всю северную и северо-восточную часть материкового склона. В расчетах с реальным атмосферным воздействием АЦТ формировались на различных глубоководных участках акватории во все сезоны, наиболее интенсивно – у северокавказского побережья в зоне сужения свала глубин, над материковым склоном у южной границы СЗШ и западной части Анатолийского побережья. Время жизни АЦТ – от нескольких дней до 4–5 недель в зависимости от месторасположения и сезона. Анализ результатов прогностических экспериментов показал, что наибольшей интенсивности АЦТ достигали на глубинах более 1000 м в период ослабления Основного черноморского течения. Профили модельной скорости течений для июня 2011 г. соответствует данным глубоководных измерений зондирующим комплексом «Аквалог», что служит свидетельством наличия АЦТ под основным пикноклином [119].

В части наличия глубоководных АЦТ результаты численных экспериментов разных типов, проведенных на основе модели МГИ, качественно согласуются между собой, хотя и существуют отличия в оценке верхней границы их формиро-

вания и интенсивности. Несмотря на то, что по результатам прогностических расчетов на сетке 1,6 км выше горизонта 1000 м АЦТ обнаружить не удалось, полагаем, что юго-восточные течения вдоль материкового склона могут существовать и здесь, поскольку в других расчетах по модели МГИ (с усвоением натуральных данных) они присутствуют. Наиболее весомым аргументом в пользу наличия АЦТ на нижней границе основного пикноклина являются данные натуральных наблюдений, с которыми получено качественное и количественное согласование модельных результатов. Также аргументом в пользу наличия течений выше 1000 м являются результаты расчетов по другим численным моделям.

3.6.5 Свидетельства наличия глубоководных течений антициклонической направленности в результатах расчетов на основе других численных моделей. Выводы о наличии АЦТ подкрепляются также результатами расчетов на основе других численных моделей, которые в небольшом объеме представлены в литературных источниках или размещены на сайтах научных проектов в качестве данных численного моделирования. Так, антициклоническая направленность климатических течений Черного моря на разных горизонтах была установлена и опубликована в следующих работах.

По результатам климатических расчетов [2] на основе Бергенской модели (Bergen ocean model, BOM) [161] антициклоническая циркуляция в Черном море была получена на горизонтах более 1300 м (ядро течения находилось на горизонтах 1300–1500 м). BOM, в отличие от рассмотренной модели МГИ, относится к классу σ -моделей, где величина вертикальной координаты $\sigma \in [0;1]$ определяется через значения вертикальной декартовой координаты z , уровня моря ζ и глубины H : $\sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta)$. Разрешение в горизонтальных направлениях в указанных экспериментах составляло 5 км, рассчитанные скорости климатических течений в глубинных слоях достигали 8 см/с.

По данным расчета климата с использованием модели ИВМ [102] – антициклоническую направленность имеют течения в области наибольшего градиента дна (на свале глубин) уже начиная с горизонта 500 м. В модели ИВМ также используется σ -координата. Численный расчет был выполнен на 40 σ -уровнях, раз-

решение в горизонтальных направлениях составляло 4 км. Максимальные скорости антициклонических течений у свала глубин на горизонте 500 м достигали 20–24 см/с, а на горизонтах 1500–1800 м величина скорости составляла до 7–9 см/с.

В работе [140] речь идет о антициклонической направленности придонных климатических течений, рассчитанных по модели В.А. Буркова [18]. Расчет был проведен в z -координатах на 5-мильной по горизонтали сетке. Показано, что в течение года в глубоководной части Черного моря в зоне локализации ОЧТ течения в придонном слое достигают скоростей 6 см/с и носят антициклонический характер, а максимальные по величине значения характерны для районов свала глубин.

Согласно работе [89], которая выполнялась на основе σ -модели INMOM (в рамках проекта РФФИ 18-05-00353 А), при расчете гидрофизических полей Черного моря в 2011 г.с атмосферным форсингом SKIRON, смена направления течений в отдельных районах отмечалась на глубинах более 800 м. Течения антициклонической направленности в глубинных слоях в зоне материкового склона были также установлены, но значения скоростей при этом получены довольно низкие – до 1,5 см/с. Расчет проводился на сетке с разрешением 1 км по горизонтали.

Расчеты динамики Черного моря в 2011 г. по z -координатной модели NEMO [191] (также в рамках проекта РФФИ 18-05-00353 А), выполненные с разрешением 4,6 км по горизонтали [147], показали наличие АЦТ начиная уже с глубины около 300 м, скорости течений на этих горизонтах достигали 3–4 см/с, а средние скорости составили около 1 см/с.

Таким образом, установленное на основе данных нескольких численных экспериментов на основе модели МГИ формирование АЦТ в районе свала глубин согласуется не только с имеющимися данными натурных наблюдений, но и с результатами отдельных расчетов с использованием других численных моделей. Проведенная комплексная оценка натурных и расчетных данных позволяет говорить о наличии АЦТ на глубинах 300–1800 м, распространяющихся вдоль материкового склона и наиболее интенсивных в весенне-летний сезон в северо-восточной области Черного моря.

3.6.6 О гипотезах формировании глубоководных течений Черного моря.

Следует отметить соответствие характеристик установленных в работе особенностей глубоководных течений имеющимся в научной литературе гипотезам их формирования.

В первую очередь, обозначим соответствие результатов исследования известному эффекту интенсификации ОЧТ в зимний период вследствие сезонного изменения поля ветра [75, 142]. Как было показано в данной работе, зимой вдоль западной границы бассейна отмечается циклоническое течение, которое обуславливается заглублением нижней границы ОЧТ до горизонтов 700–1200 м (в разные годы). Такое течение может распространяться на указанных глубинах на восток до середины Анатолийского побережья и достигать скоростей 20 см/с.

Возможность генерации глубоководных течений в океане под влиянием ветрового импульсного воздействия обосновывается в монографии [78]. Этот эффект продемонстрирован в диссертации на примере воздействия на Черное море квазитропического циклона 25–29 сентября 2005 г. Показано, что действительно, реакция морской среды на резкую интенсификацию ветра может заключаться в значительной перестройке структуры течений не только вблизи поверхности моря, но и по всей глубине. Отмечен существенный рост скоростей течений в области атмосферного циклона, в том числе на глубинных горизонтах – до 15–20 см/с.

Что касается возникновения глубоководных течений антициклонической направленности, то в проведенных численных экспериментах непосредственной зависимости появления АЦТ от изменения атмосферных параметров установлено не было. Вместе с тем, для типичных синоптических условий в литературе существует ряд предположений, объясняющих возможность формирования таких течений. Так, ряд авторов указывает на возможность генерации течений, распространяющихся вдоль свала глубин в антициклоническом направлении, как результата низкочастотных волновых процессов под основным пикноклином. На формирование подобных течений на горизонтах более 300 м указывается, например, в работах [14, 95, 96, 132]. Обнаруженная по результатам моделирования пе-

риодичность в интенсивности АЦТ на масштабах от нескольких суток до нескольких недель может служить аргументом в пользу волновой гипотезы.

Образование АЦТ можно связать также с прохождением вблизи свала глубин мезомасштабных антициклонических вихрей [72, 92], которые действуют как непосредственно в качестве генераторов струйного течения между периферией вихря и свалом глубин, так и изменяют наклон изопикнических поверхностей, вследствие чего также могут формироваться внутренние волны и градиентные течения. Подобные АЦТ противотечения (*undercurrents*), связываемые с прохождением у границы шельфовой зоны мезомасштабных антициклонических вихрей, отмечались ранее и для других районов Мирового океана, например, для западного побережья Бенгальского залива [178]. Распространение АЦТ в Черном море между цепочками слабых антициклонических вихрей и дном показано в данной работе (Рисунки 2.9 и 3.5). Согласно предположению авторов [139], течения антициклонической направленности, возникающие у северокавказского побережья, можно интерпретировать и как части сильно вытянутых вдоль материкового склона антициклонических вихрей.

Вместе с тем, наиболее часто образование мезомасштабных антициклонических вихрей происходит вследствие сезонного, весенне-летнего ослабления и меандрирования ОЧТ, в свою очередь, связанного 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 нерегулярных противотечений в глубинных слоях при текущем уровне обеспеченности данными натурных наблюдений затруднительно. В сложной системе взаимодействия атмосферы и моря для выяснения предпосылок появления глубоководных течений антициклонической направленности и определения доминирующего вынуждающего фактора требуется значительно больший массив данных наблюдений и проведение дальнейших исследований.

Выводы к Разделу 3

Результаты проведенных прогностических расчетов на сетке 1,6 км с учетом реального атмосферного воздействия позволили выявить следующие особенности течений Черного моря. Показано, что общее направление циркуляции в бассейне является циклоническим, а структура течений в верхнем слое моря сохраняется до глубины ~300 м. На горизонтах 300–500 м еще содержатся отдельные элементы, характерные для динамики верхнего слоя (глубинные части западной ветви ОЧТ, наиболее крупных мезомасштабных вихрей).

Поле скоростей на глубинах более 500 м характеризуется наличием многочисленных мезомасштабных вихрей и течений. Западная часть ОЧТ в отдельные периоды (чаще – зимой) может отмечаться до глубин 700–1200 м в виде струйного циклонического течения вдоль свала глубин со скоростями до 15–20 см/с. Средние скорости глубоководных течений составляют 2–5 см/с, а максимальные могут достигать 15–20 см/с. Сезонная интенсификация течений наблюдается осенью и зимой.

В глубоководной части моря выявлены вихри, которые на поверхности моря обнаруживаются нерегулярно, тогда как с нижней границы основного пикноклина (с глубин 150–300 м) их структура прослеживается отчетливо. Скорости в таких вихрях могут составлять до 15–20 см/с. Вихри центральной абиссальной части моря сохраняют свою структуру до дна.

На свале глубин особенности рельефа могут приводить к деформации глубоководных вихрей и преобразованию их в вихри более мелких масштабов. Обнаруженная по результатам климатического эксперимента смена знака завихренности в области Севастопольского антициклона на глубинах 400–550 м и формирование к юго-западу от Крыма нескольких более мелких вихрей подтверждается результатами расчетов с реальным атмосферным воздействием и соответствует опубликованным результатам наблюдений в этом районе [14, 95, 97, 98].

По результатам прогностических расчетов на сетке 1,6 км квазипериодические АЦТ со скоростями до 15–20 см/с, распространяющиеся вдоль континен-

тального склона в разных частях моря, обнаруживаются на горизонтах 1000 м и более. Течения антициклонической направленности формируются во все сезоны, наиболее часто в весенне-летний период, имеют ширину до 10–12 км и продолжительность от одной до нескольких недель.

На основе результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря за период 1992–2012 гг. проведено исследование среднесуточных полей и осредненных многолетних данных скорости течений. Показано, что средние скорости на горизонтах более 500 м довольно низкие (до 2 см/с), а общее направление циркуляции является циклоническим. На этом фоне существуют мезомасштабные динамические структуры с характерными скоростями в несколько раз выше (максимально до 20 см/с). Это в основном глубоководные циклонические вихри, которые в средних полях четко прослеживаются на горизонтах 500 м и более. Вихри трансформируются и смещаются в абиссальной области в западном направлении со скоростями около 1–2 см/с. Наиболее часто они формируются в центре восточной половины моря, примерно между 34° и 38° в.д. Антициклонические вихри под основным пикноклином формируются преимущественно по периферии бассейна и значительно уступают циклоническим в интенсивности. Они характеризуются низкими скоростями (до 3–5 см/с), наиболее часто формируются весной и диссипируют в конце лета. В результате анализа среднемесячных скоростей установлено наличие АЦТ, распространяющихся вдоль узкого свала глубин в районе северокавказского побережья. Они квазипериодически определяются на глубинах более 300 м. Формирование АЦТ происходит преимущественно в весенне-летний период и согласуется с ослаблением вышележащего ОЧТ. С марта оно обнаруживается на глубине 300–500 м, в мае достигает горизонта 1000 м, а в июне – 1500 м.

Рассмотрена трансформация глубоководных течений под влиянием экстремального ветрового воздействия (квазитропического циклона 25–29 сентября 2005 г.). Показаны качественные и количественные особенности гидрофизических полей, формирующиеся под воздействием интенсивного атмосферного вихря. К ним относятся возникновение циклонического круговорота в области действия квазитропического циклона, струйного течения вдоль границ бассейна, развитие

мощного апвеллинга в центральной части циклона. Установлено увеличение скоростей течений на всех горизонтах в несколько раз, в том числе – до 15–20 см/с в глубинных слоях.

Сопоставление результатов численных экспериментов, проведенных с учетом реального атмосферного воздействия, и доступных данных натурных наблюдений показало, что максимальные значения скорости (до 15–20 см/с) на глубоководных горизонтах достигаются в мезомасштабных вихревых структурах и узких течениях вдоль материкового склона. При этом фоновые значения скоростей довольно низкие (до 1–2 см/с). Присутствие вихревых структур разных знаков 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 форсингом в целом соответствуют расчетам 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.

Наличие АЦТ, распространяющихся вдоль континентального склона под основным пикноклином, было обнаружено в результатах всех численных экспериментов и не противоречит имеющимся данным наблюдений, а в районе северокавказского побережья – согласуется с данными измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик». К ним относятся данные измерений профиля скорости течений с помощью зондирующего комплекса «Аквалог» в июне 2011 г., расчеты скорости на основе судовых STD-измерений на глубоководных разрезах, проведенных в период 1997–2008 гг. и данные буя ARGO № 6901833, дрейфовавшего в этом районе в 2016–2017 г.

Основные результаты Раздела 3 опубликованы в статьях [35, 40, 51, 53, 58, 62, 109, 127, 169], тезисах и материалах конференций [25, 59, 61, 63, 101, 103, 111–114, 116–118, 121–123, 125, 135, 136, 174].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы таковы.

1. Проведен совместный анализ массивов данных глубоководных натуральных наблюдений: измерений скоростей течений из БОД МГИ, выполненных в период 1960–2016 гг., данных автономных профилирующих буев ARGO за 2005–2015 гг., судовых STD–измерений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» в 1997–2008 гг. и результатов глубоководных измерений зондирующим комплексом «Аквалог» в июне 2011 г. Это позволило выявить особенности поля течений Черного моря: установлены факты смены направления течений с глубиной и увеличения скоростей на глубоководных горизонтах, 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 скоростей перемещения буев в окрестностях их парковочных глубин показал сезонную изменчивость скоростей течений на горизонтах 350–1600 м. Наибольшие скорости отмечены в январе–марте, а 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 имели 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. Неко-

торые из них можно соотнести с известными вихрями в верхнем слое моря (Батумским, Севастопольский антициклонами, восточным и западным циклоническим круговоротами и др.) и особенностями рельефа дна. Показано, что глубоководные течения распространяются вдоль материкового склона, и 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 на сетке с горизонтальным разрешением 5 км с ассимиляцией среднесезонных 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, распространяющиеся вдоль континентального склона. Показано, что в среднем величины скоростей под основным пикноклином на порядок ниже, чем на поверхности: фоновые значения климатических скоростей составляют 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 временных интервалов – прогностических расчетов на сетке 1,6 км и многолетнего реанализа гидрофизических полей Черного моря – позволил уточнить представления о структуре глубоководных течений, полученной 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 в зимний сезон может достигать горизонта 1200 м в виде узкого течения вдоль материкового склона. Во всех расчетах на глубинах более 300–500 м при фоновых значениях скоростей до 1–2 см/с установлено наличие мезомасштабных вихрей и струйных течений, в которых средние значения скорости составляют от 5 до 8 см/с, а максимальные достигают 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 сентября 2005 г., что экстремальное атмосферное воздействие на Черное море может приводить к существенной трансформации поля скоростей и значительному (в несколько раз) усилению глубоководных течений. 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 $+10^{\circ}\text{C}$, усилению струйного течения вдоль границ бассейна и возрастанию скоростей течений по всей глубине в зоне действия вихря до 15–20 см/с. 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 натуральных 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, ретроспективного анализа). Они обнаруживаются в слое от нижней границы постоянного пикноклина (250–300 м) до глубины 1700–1800 м. 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. У северокавказского побережья наличие АЦТ согласуется с данными натурных наблюдений на Черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» и данными буя ARGO № 6901833.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБС – автономная буйковая станция;

АЦТ – течение антициклонической направленности;

БОД МГИ – Банк океанографических данных МГИ;

ГК – климатический массив данных температуры и солёности Черного моря, полученный в [6] на основе данных многолетних натуральных наблюдений («гидрологический климат»);

ГОИН – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова» (ФГБУ «ГОИН»);

ИМБИ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН» (ФГБУН ИМБИ);

ИМБЮМ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФГБУН ФИЦ ИМБЮМ);

ИнБЮМ НАНУ – Институт биологии южных морей Национальной академии наук Украины;

ИО РАН – Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

ИПМех РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук;

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии – основанная в 1957 г. межправительственная организация в системе ООН;

МГИ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН ФИЦ МГИ);

МГИ НАНУ – Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины;

МГУ – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;

НАНУ – Национальная академия наук Украины;

НИС – научно-исследовательское судно;

ООН – Организация Объединённых Наций – международная организация, созданная в 1945 г. для поддержания и укрепления международного мира и безопасности, развития сотрудничества между государствами;

РАН – Российская академия наук;

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований;

СевГУ – Севастопольский государственный университет;

СЗШ – северо-западный шельф;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

ХПС – холодный промежуточный слой;

ЮБК – Южный берег Крыма;

ЮНЕСКО – (UNESCO – *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) – специализированное учреждение ООН по вопросам образования, науки и культуры;

ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) – акустический доплеровский измеритель течений;

CTD – измерения «*Conductivity-Temperature-Depth*» – определение солёности/электропроводности морской воды, температуры и глубины/давления в точке наблюдений;

SST (*Sea Surface Temperature*) – температура поверхности моря;

WoS – международная наукометрическая база Web of Science

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов, Ю.В. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева, Д.В. Алексеев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34. – № 3 (201). – С. 247–253.
2. Архипкин, В.С. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солености и циркуляции вод Черного и Каспийского морей / В.С. Архипкин, А.Н. Косарев, Ф.Н. Гиппиус [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5 «География». – 2013. – № 5. – С. 33–44.
3. Багаев, А.В. Глубинная циркуляция Черного моря: численное моделирование и данные дрейфующих буев / А.В. Багаев, С.Г. Демьшев, Н.В. Маркова // Тезисы докладов научной конференции «Мировой океан: модели, данные, оперативная океанология» (Севастополь, 26–30 сентября 2016 г.). – Севастополь: МГИ, 2016. – С. 42–43.
4. Багаев, А.В. Глубоководная динамика Черного моря: измерения и анализ / А.В. Багаев, Н.В. Маркова, Т.В. Пластун // Материалы научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук (Ростов-на-Дону, 13–16 декабря 2017 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. – С. 297–298.
5. Багаев, А.В. Численное моделирование климатической циркуляции Черного моря с использованием параметризации Меллора-Ямады 2.5 / А.В. Багаев, С.Г. Демьшев, Г.К. Коротаев, Е.В. Плотников // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 66–76.
6. Белокопытов, В.Н. Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря. Дисс. ... канд. геогр. наук. // Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2004. – 160 с.
7. Белокопытов, В.Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря. Дисс. ... доктора геогр. наук. // Севастополь: ФГБУН МГИ. –

2017. – 377 с. – [Электронный ресурс] URL: http://mhiras.ru/assets/files/Belokopytov_thesis.pdf (Последнее обращение 21.09.2020).

8. Беляев, В.И. Закономерности распространения радиоактивных элементов в океане / В.И. Беляев, А.Г. Колесников, Б.А. Нелепо // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1967. – Т. 3, № 10. – С. 1092–1100.

9. Беляев, В.И. Определение интенсивности вертикального переноса в Черном море по его радиоактивной зараженности / В.И. Беляев, А.Г. Колесников, Б.А. Нелепо // Сборник докладов, подготовленных ко 2-му Международному океанографическому конгрессу. – Киев: Наукова думка, 1966. – С. 3–10.

10. Блатов, А.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А.С. Блатов, Н.П. Булгаков, В.А. Иванов [и др.] // Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 238 с.

11. Богатко, О.Н. Поверхностные течения Черного моря / О.Н. Богатко, С.Г. Богуславский, Ю.М. Беляков [и др.] // Комплексные океанографические исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1979. – С. 25–33.

12. Булгаков, Н.П. Проявление Противотечения в Черном море в полях плотности воды и гидростатического давления / Н.П. Булгаков, С.Н. Булгаков // Морской гидрофизический журнал. – 1995. – № 4. – С. 63–76.

13. Булгаков, С.Н. Возможный механизм стационарной циркуляции вод Черного моря / С.Н. Булгаков, Г.К. Коротаев // Комплексные исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1984. – С. 32–40.

14. Булгаков, Н.П. К вопросу существования глубинной антициклонической циркуляции в Черном море / Н.П. Булгаков, Ю.Н. Голубев // Комплексные океанографические исследования Черного моря (гидрология, гидрофизика, гидрохимия). Сб. науч. тр. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1990. – С. 23–29.

15. Булгаков, С.Н. Особенности поля течений в северо-западной части Черного моря / С.Н. Булгаков, В.М. Кушнир // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 5. – С. 66–78.

16. Булгаков, С.Н. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Ч. 1, 2 / С.Н. Булгаков,

Г.К. Коротаев, Дж.А. Уайтхед // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 548–564.

17. Булгаков, С.Н. Роль халинных факторов в формировании циркуляции вод Черного моря / С.Н. Булгаков, Г.К. Коротаев // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях – М.: Наука, 1989. – С. 71–78.

18. Бурков, В.А. Общая циркуляция вод Тихого океана / В.А. Бурков // М.: Наука, 1972.– 195 с.

19. Владимирцев, Ю.А. К вопросу о глубинной циркуляции в Черном море / Ю.А. Владимирцев // Океанология. – 1964. – Т. 4, № 6. – С. 1013–1019.

20. Водяницкий, Б.А. Основной водообмен и история формирования солености Черного моря // Тр. Севастопольской биологической станции. – 1948. – Т. 6. – С. 386–432.

21. Герасимова, С.В. Оценка скоростей глубоководных течений по данным ARGO / С.В. Герасимова, Е.Е. Лемешко // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Вып. 15. – С. 187–196.

22. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.4. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 103–262.

23. Голубев, Ю.Н. Кинематика и структура вод антициклонического вихревого образования в центральной части Черного моря / Ю.Н. Голубев, В.С. Тужилкин // Океанология. – 1990. – Т. 30, № 4. – С. 575–581.

24. Грузинов, В.М. Оценки параметров краевых внутренних волн в Черном море / В.М. Грузинов, Н.А. Дианский, Н.Н. Дьяков, Д.В. Степанов // Труды ГОИН. – 2018. – № 219. – С. 205–226.

25. Демышев, С.Г. Анализ глубоководных течений Черного моря на основе численных экспериментов и данных наблюдений / С.Г. Демышев, Н.В. Маркова // Теплофизика и физическая гидродинамика. Тезисы докладов II Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых (Ялта, Республика

Крым, 11 – 17 сентября 2017 г.). – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2017. – С. 86.

26. Демышев, С.Г. Анализ климатических полей Черного моря ниже основного пикноклина, полученных на основе усвоения архивных данных температуры и солености в численной гидродинамической модели / С.Г. Демышев, В.А. Иванов, Н.В. Маркова // Морской гидрофизический журнал. – 2009.– № 1.– С. 3–15.

27. Демышев, С.Г. Анализ трехмерных гидрофизических полей Черного моря в районе Голицынского газоконденсатного месторождения / С.Г. Демышев, С.В. Довгая., Н.В. Маркова // Тезисы Межвузовской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» (Москва, РГГРУ 25–27 марта 2008 г.) – Москва: РГГРУ, 2008. – С. 238.

28. Демышев, С.Г. Аппроксимация силы плавучести в численной модели бароклинных течений океана / С.Г. Демышев // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – 34, №3. – С. 404–412.

29. Демышев, С.Г. Влияние потоков тепла, осадков и испарения на динамику поверхностных вод Мраморного моря / С.Г. Демышев, С.В. Довгая, М.В. Шокуров // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – № 3. – С. 3–15.

30. Демышев, С.Г. Моделирование гидрофизических полей Черного моря в январе-сентябре 2006 года с высоким пространственным разрешением с использованием параметризации Меллора-Ямады / С.Г. Демышев, О.А. Дымова // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 5. – С. 59–69.

31. Демышев, С.Г. Исследование чувствительности параметризации Меллора-Ямады к выбору конечно-разностных аналогов в численной трехмерной модели оперативного прогноза течений в Черном море / С.Г. Демышев // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 3. – С. 29–39.

32. Демышев, С.Г. Моделирование последствий возможного захоронения токсичных веществ в глубоководной зоне Черного моря / С.Г. Демышев, А.С. Запевалов, Т.В. Чудиновских, Д.У. Ментц // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. – С. 64–74.

33. Демышев, С.Г. Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря / С.Г. Демышев, В.В. Кныш, Г.К. Коротаев // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – 40, №2. – С. 259–270.

34. Демышев, С.Г. Моделирование циркуляции Черного моря с высоким пространственным разрешением / С.Г. Демышев, О.А. Дымова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2011. – Вып. 25 (2) – С. 114–135.

35. 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.

36. 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.

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

38. 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.

39. Демышев, С.Г. Расчет и анализ течений в прибрежных районах Черного моря для целей междисциплинарных исследований / С.Г. Демышев, В.А. Иванов, Н.В. Маркова, Л.В. Черкесов // Тезисы докладов Международной

научной конференции «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей» (Крым, Донузлав, 13–16 сентября 2005 г.). – Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 24.

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

41. 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. – 2006. – №4. – С. 104–107.

42. Демышев, С.Г. Результаты прогностического расчета гидрофизических полей Черного моря с высоким пространственным разрешением / С.Г. Демышев, О.А. Дымова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 22 – С. 22–30.

43. Демышев, С.Г. Результаты расчета адаптированных полей Черного моря на основе ассимиляции в модели данных по климатической температуре и солености / С.Г. Демышев, В.В. Кныш, Г.К. Коротаев // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 604–617.

44. Демышев, С.Г. Реконструкция адаптированной вертикальной скорости Черного моря на базе синтеза модели циркуляции и климатических данных по температуре и солености / С.Г. Демышев, В.В. Кныш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 11 – С. 93–104.

45. Демышев, С.Г. Реконструкция климатических течений Черного моря с высоким пространственным разрешением на основе синтеза архивных полей температуры и солености и численной вихреразрешающей модели / С.Г. Демышев, В.А. Иванов, Н.В. Маркова, Л.В. Черкесов // Тезисы докладов Международной научной конференции «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке». – Севастополь, МГИ НАНУ, 2006. – С. 105.

46. Демышев, С.Г. Сезонная изменчивость и трансформация с глубиной климатических горизонтальных течений Черного моря по результатам ассимиляции в модели новых климатических данных температуры и солености / С.Г. Демышев, В.В. Кныш, Н.В. Инюшина // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 6. – С. 28–45.
47. Демышев, С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море / С.Г. Демышев // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 137–149.
48. Демышев, С.Г. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C / С.Г. Демышев, Г.К. Коротаев // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163–231.
49. Демышев, С.Г. Численное моделирование влияния обмена через проливы Босфор и Дарданелы на гидрофизические поля Мраморного моря / С.Г. Демышев, С.В. Довгая, В.А. Иванов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – 48, № 4. – С. 418–426.
50. Демышев, С.Г. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря / С.Г. Демышев, В.В. Кныш, Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 3. – С. 12–27.
51. Демышев, С.Г. Численные эксперименты по реконструкции глубинных течений в Черном море / С.Г. Демышев, О.А. Дымова, Н.В. Маркова, В.Б. Пиотух // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №2. – С. 38–52.
52. Демышев, С.Г. Численный эксперимент по моделированию климатических полей на северо-западном шельфе Черного моря в зимний и летний сезоны / С.Г. Демышев, Н.А. Евстигнеева // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 2. – С. 18–36.
53. 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 исслед-

дования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 19. – С. 335–369.

54. Демышев, С.Г. Численный эксперимент по расчету полей плотности и скорости течений Черного моря в летний сезон / С.Г. Демышев // Морской гидрофизический журнал. – 1991. – № 4. – С. 41–45.

55. Дианский, Н.А. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи / Н.А. Дианский, В.В. Фомин, Н.В. Жохова, А.Н. Коршенко // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49. – № 6. – С. 664–675.

56. Дивинский, Б.В. Тенденции в динамике волнового климата открытой части Черного моря за период с 1990 по 2014 гг. / Б.В. Дивинский, Р.Д. Косьян // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 928–934.

57. Добровольский, А.Д. Моря СССР. / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.

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

59. 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 [и др.] // Тезисы докладов Международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (пгт Кацивели, 15–18 сентября 2014 г.) – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – С. 213–214.

60. Дорофеев, В.Л. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря / В.Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 52–68.

61. Дымова, О.А. Моделирование летнего режима глубоководной циркуляции Черного моря на примере 2013 г. / О.А. Дымова, Н.А. Миклашевская, Н.В. Маркова // Сборник трудов школы «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 24–26 октября 2018 г.). – Москва: ИП-Мех РАН, 2018. – С. 140–141.

62. Дымова, О.А. Особенности глубоководной циркуляции Черного моря летом 2013 г. / О.А. Дымова, Н.А. Миклашевская, Н.В. Маркова // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря. – 2019. – № 1. – С. 40–47.

63. Дымова, О.А. Реконструкция гидрофизических полей Черного моря в январе–сентябре 2006 года / О.А. Дымова, Н.В. Маркова // Материалы VII Международной научной конференции «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Днепропетровский национальный университет, 11–14 мая 2010 г.). – Днепропетровск: ДНУ, 2010. – С. 24–26.

64. Еремеев, В.Н. Слоистая структура течений и вертикальный обмен в Черном море / В.Н. Еремеев, В.М. Кушнир // Океанология. – 1996. – Т.36, №1. – С. 13–19.

65. Еремеев, В.Н. Численное моделирование внутрисезонной изменчивости циркуляции вод Черного моря. / В.Н. Еремеев, С.В. Кочергин // Препринт. Севастополь: МГИ НАН Украины. – 1991. – 31 с.

66. Ефимов, В.В. Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей / В.В. Ефимов, Н.А. Тимофеев – Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 1990. – 237 с.

67. Ефимов, В.В. Наблюдения квазитропического циклона над Черным морем / В.В. Ефимов, С.В. Станичный, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 4. – С. 53–62.

68. Ефимов, В.В. Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем / В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 1–21.

69. Елкин, Д.Н. Лабораторное моделирование механизма образования субмезомасштабных вихрей на шельфе Черного моря / Д.Н. Елкин, А.Г. Зацепин // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспеди-

ционные исследования. Материалы молодежной научной конференции. – Севастополь: МГИ РАН, 2016. – С. 65–70.

70. Журбас, В.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / В.М. Журбас, А.Г. Зацепин, Ю.В. Григорьева // *Океанология*. – 2003. – Т. 43, № 6. – С. 1–15.

71. Залесный, В.Б. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических характеристик Черного моря / В.Б. Залесный, А.А. Кордзадзе, А.Г. Гиртвлишани // *Численное моделирование динамики океанов и внутренних водоемов*. – Новосибирск. – 1984. – С. 57–59.

72. Зацепин, А.Г. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа / А.Г. Зацепин, Д.Н. Елкин, А.О. Корж [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. – 2016. – № 3 (189). – С. 16–25.

73. Зацепин, А.Г. Опыт измерения скорости поверхностных течений в прибрежной зоне Черного моря доплеровским КВ-радаром / А.Г. Зацепин, В.В. Горбацкий, В.И. Баранов [и др.] // *Труды Государственного океанографического института*. – 2017. – № 218. – С. 105–119.

74. Зацепин, А.Г. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А.Г. Зацепин, А.Г. Островский, В.В. Кременецкий [и др.] // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 16–29.

75. Ибраев, Р.А. Диагноз климатической сезонной циркуляции и изменчивости холодного промежуточного слоя Черного моря / Р.А. Ибраев, Д.И. Трухчев // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 1996. – Т. 32, № 5. – С. 655–671.

76. Иванов, В.А. Океанография Черного моря / В.А. Иванов, В.Н. Белокопытов. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2011. – 212 с.

77. Иванов, В.А. Статистический анализ и численное моделирование осцилляций гидродинамических параметров моря в субинерционном диапазоне на шельфе Крыма / В.А. Иванов, А.В. Багаев, О.А. Дымова, Т.В. Пластун // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – №6. – С. 61–76.

78. Каменкович, В.М. Синоптическме вихри в океане / В.М. Каменкович, М.Н. Кошляков, А.С. Монин – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
79. Климок, В.И. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря / В.И. Климок, К.К. Макешов // Морской гидрофизический журнал. – 1992. – № 1. – С. 27–34.
80. Кныш, В.В. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в σ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености / В.В. Кныш, А.И. Кубряков, Н.В. Инюшина, Г.К. Коротаев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 243–265.
81. Кныш, В.В. Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солености и их ассимиляции в модели / В.В. Кныш, Г.К. Коротаев, С.Г. Демышев, В.Н. Белокопытов // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 11–30.
82. Кныш, В.В. Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели / В.В. Кныш, С.Г. Демышев, Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 2. – С. 36–52.
83. Кныш, В.В. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах / В.В. Кныш, Г.К. Коротаев, А.И. Мизюк, А.С. Саркисян // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 67–85.
84. Коновалов, С.К. Математическое моделирование распределения нефтяных углеводородов в аэробных и анаэробных водах Черного моря / С.К. Коновалов, С.Г. Демышев, А.С. Запевалов // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 6. – С. 53–67.
85. Кордзадзе, А.А. Численное моделирование гидрофизических полей Черного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов / А.А. Кордзадзе, Д.И. Деметрашвили, А.А. Сурмава // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 227–238.

86. Коротаев, Г.К. Архитектура и результаты работы Международного черноморского центра морских прогнозов, созданного на базе МГИ НАН Украины в рамках проекта Европейского Союза «Мой Океан» / Г.К. Коротаев, С.Г. Демьшев, В.Л. Дорофеев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2013. – № 27. – С. 128–133.

87. Коротаев, Г.К. Интенсификация с глубиной циркуляции в мезомасштабном бассейне под влиянием рельефа дна / Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 26. – С. 3–10.

88. Коротаев, Г.К. О причине сезонного хода циркуляции Черного моря / Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 6. – С. 14–20.

89. Коршенко, Е.А. Воспроизведение глубоководной циркуляции Черного моря с помощью модели INMOM и сопоставление результатов с данными буев ARGO / Е.А. Коршенко, Н.А. Дианский, В.В. Фомин // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т. 35, № 3. – С. 220–232.

90. Косьян, Р.Д. Динамические процессы береговой зоны моря / Р.Д. Косьян, И.С. Подымов, Н.В. Пыхов – М.: Научный мир, 2008. – 255 с.

91. Кочергин, С.В. Идентификация начального поля концентрации Cs^{137} в Черном море после Чернобыльской аварии на основе решения сопряженной задачи / С.В. Кочергин, В.С. Кочергин // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 6. – С. 36–42.

92. Кривошея, В.Г. К вопросу о режиме течений на шельфе у северокавказского побережья Черного моря / В.Г. Кривошея, Л.В. Москаленко, В.Б. Титов // Океанология. – 2004. – Т. 44, № 3. – С. 358–363.

93. Кубряков, А.И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря / А.И. Кубряков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 31–50.

94. Куклев, С.Б. Моделирование мезомасштабной изменчивости морских течений шельфовой зоны северокавказского побережья Черного моря /

С.Б. Куклев, Б.В. Дивинский, А.Г. Зацепин // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере. Сборник трудов Международного симпозиума. – ИО РАН, Московский университет им. С.Ю. Витте, 2018. – С. 209–212.

95. Латун, В.С. О движениях глубинных слоев Черного моря / В.С. Латун // Комплексные океанографические исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. – С. 9–16.

96. Латун, В.С. О влиянии длинных волн на прибрежные течения / В.С. Латун // Мор. гидрофиз. исслед. – Севастополь: МГИ АН УССР. – 1970. – № 2 (48). – С. 27–36.

97. Латун, В.С. Структура поля плотности и циркуляции вод в глубоком черноморском антициклоне / В.С. Латун // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Сб. науч. тр. НАН Украины. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 1992. – С. 92–94.

98. Лемешко, Е.М. Вертикальная структура поля скорости течений в северо-западной части Черного моря по данным LADCP в мае 2004 г. / Е.М. Лемешко, А.Н. Морозов, С.В. Станичный // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 6. – С. 25–37.

99. Леонов, А.К. Региональная океанография. Часть 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря / А.К. Леонов. – Л: Гидрометеиздат, 1960. – 765 с.

100. Лишаев, П.Н. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П.Н. Лишаев, Г.К. Коротаев, В.В. Кныш [и др.] // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 5. – С. 49–68.

101. Лукьянова, А.Н. Исследование глубинной циркуляции в Черном море по модельным расчетам и архивным данным / А.Н. Лукьянова, Т.В. Пластун, А.В. Багаев, Н.В. Маркова // Тезисы IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (с международным участием) по проблемам водных

экосистем «Понт Эвксинский – 2015» (Севастополь, ИМБИ, 17–20 ноября 2015 г.). – Севастополь: DigitPrint, 2015. – С. 98–99.

102. 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 [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016. – № 3. – С. 9–14.

103. Лукьянова, А.Н. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: ч. II. Численные эксперименты на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными Банка данных МГИ РАН / А.Н. Лукьянова, А.В. Багаев, Т.В. Пластун [и др.] // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции. – Севастополь: МГИ РАН, 2016. – С. 111–116.

104. Мамаев, О.И. Океанографический анализ в системе а-S-T- ρ . / О.И. Мамаев. – М: Изд. МГУ, 1963. – 228 с.

105. Мамаев, О.И. T,S-анализ вод Черного моря / О.И. Мамаев, В.С. Архипкин, В.С. Тужилкин // Океанология. – 1994. – Т. 34, № 2. – С. 178–192.

106. Маркова, Н.В. Анализ климатических течений в юго-восточной части Черного моря / Н.В. Маркова // Тезисы докладов Международной научной конференции «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей» (Крым, Донузлав, 13–16 сентября 2005 г.). – Севастополь: МГИ НАНУ, 2005.– С. 128.

107. Маркова, Н.В. Анализ модельного климатического поля температуры Черного моря / Н.В. Маркова // Тезисы конференции «Ломоносовские чтения – 2007». – Севастополь: ЧФ МГУ, 2007.– С. 17–19.

108. Маркова, Н.В. Анализ некоторых мезомасштабных особенностей климатических течений в районе Крымского побережья / Н.В. Маркова // Тезисы конференции «Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины»). – Севастополь: МГИ НАНУ, 2007. – С. 55–56.

109. 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. 44–50.

110. Маркова, Н.В. Годовой ход трехмерных полей температуры, солености и течений на северо-западном шельфе Черного моря как результат численного моделирования / Н.В. Маркова // «Водные ресурсы: изучение и управление»: лимнологическая школа – практика. Материалы 5-й Международной конференции молодых ученых (Петрозаводск, 5–8 сентября 2016 г.). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. – Т.1. – С. 109–116.

111. Маркова, Н.В. Изменчивость глубоководной циркуляции Черного моря по данным реанализа / Н.В. Маркова // Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика» г. Ялта, Республика Крым (10–16 сентября 2018 г.). – Институт теплофизики СО РАН Новосибирск, 2018. – С. 266.

112. Маркова, Н.В. Исследование гидрофизических полей Черного моря под основным пикноклином: валидация результатов численного моделирования на основе данных ARGO / Н.В. Маркова, О.А. Дымова, С.Г. Демышев // Сборник трудов школы «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 24–26 октября 2018 г.). – Москва: ИПМех РАН, 2018. – С. 180–182.

113. Маркова, Н.В. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: ч. I. численные эксперименты на основе модели МГИ / Н.В. Маркова, О.А. Дымова, С.Г. Демышев // Сборник материалов молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, МГИ, 25–29 апреля 2016 г.). – Севастополь: МГИ, 2016. – С. 122–127.

114. Маркова, Н.В. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря с использованием контактных измерений / Н.В. Маркова, Т.В. Пластун // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной

конференции молодых ученых (Москва, ИО РАН, 10–14 апреля 2017 г.). – Москва: ИО РАН, 2017. – С. 169–170.

115. Маркова, Н.В. Исследование климатического поля течений на северо-западном шельфе Черного моря / Н.В. Маркова // Тезисы докладов Международной научной школы-конференции «Рациональное природопользование» (Москва, МГУ, 7–9 декабря 2005 г.). – Москва: Изд. МГУ, 2005. – С. 238–242.

116. Маркова, Н.В. Исследование обратных глубинных течений в зоне материкового склона Черного моря / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: III Международная школа молодых ученых. Сборник материалов школы. (Москва, 1–3 ноября 2017 г.). – Москва: ИПМех РАН, 2017. – С. 142–144.

117. Маркова, Н.В. Исследование пространственной структуры глубоководных течений в северо-восточной части Черного моря / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Прикладные задачи математики. Материалы XXV международной научно-технической конференции (Севастополь, СевГУ, 18–22 сентября 2017 г.). – Севастополь: СевГУ, 2017. – С. 94–96.

118. Маркова, Н.В. Математическое моделирование и анализ мезомасштабной циркуляции Черного моря / Н.В. Маркова // Тезисы конференции «Ломоносовские чтения – 2010» (ЧФ МГУ, Севастополь, 22–23 апреля 2010 г.) – ЧФ МГУ: Севастополь, 2010. – С. 91–92.

119. 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.

120. Маркова, Н.В. Особенности гидрофизических полей Черного моря ниже основного пикноклина / Н.В. Маркова // Тезисы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых «Понт Эвксинский–2009» (Севастополь, ИнБЮМ НАНУ, 21–24 сентября 2009 г.). – Севастополь: Дизайн-Центр, 2009. – С. 80–81.

121. Маркова, Н.В. Особенности глубоководной циркуляции Черного моря по данным гидрофизического реанализа / Н.В. Маркова // Прикладные задачи математики. Материалы 26-й международной научно-технической конференции. – Севастополь: СевГУ, 2018. – С. 136–138.

122. Маркова, Н.В. Отклик Черного моря на воздействие квазитропического циклона / Н.В. Маркова // Материалы V Международной научной конференции студентов и аспирантов «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Днепропетровский национальный университет, 24–25 апреля 2008 г.) – Днепропетровск: ДНУ, 2008. – С. 37–39.

123. Маркова, Н.В. Реконструкция гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря на основе численного моделирования / Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Тезисы докладов научно-практической конференции «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (Севастополь, МГИ, 16–18 сентября 2015 г.) – Севастополь: МГИ, 2015. – С. 126–127.

124. Маркова, Н.В. Реконструкция и анализ поля течений северо-западного шельфа Черного моря / Н.В. Маркова // Материалы конференции «Литодинамика донной контактной зоны океана» (Москва, ИО РАН, 14–17 сентября 2009 г.) – Москва: ИО РАН, 2009. – С. 29–31.

125. Маркова, Н.В. Структура поля вертикальной скорости в зоне континентального склона Черного моря (по данным моделирования) / Н.В. Маркова // Моря России: наука, безопасность, ресурсы. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции (Севастополь, 4–7 октября 2017 г.). – Севастополь: МГИ, 2017. – С. 207–208.

126. Маркова, Н.В. Термохалинные и динамические особенности климатических полей Черного моря в районе северокавказского 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.

127. Маркова, Н.В. Численные эксперименты на основе модели Морского гидрофизического института 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.
128. Маркова, Н.В. Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев – профиломеров ARGO / Н.В. Маркова, А.В. Багаев // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №3. – С. 26–39.
129. Маркова, Н.В. Региональные особенности поля течений на северо-западном шельфе Черного моря / Н.В. Маркова // Тезисы 4-й Всеукраинской научно-практической конференции «Понт Эвксинский – 2005» по проблемам Черного и Азовского морей – Севастополь: ИнБЮМ, 2005. – С. 96–97.
130. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
131. Морозов, А.Н. Акустический доплеровский профилометр течений как элемент комплексной системы оперативного контроля состояния водной среды в прибрежной зоне моря / А.Н. Морозов, В.А. Иванов, С.А. Шутов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2017. – № 1. – С. 23–31.
132. Морозов, А.Н. Структура течений в Черном море по результатам наблюдений LADCP в 2004–2014 гг. / А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко, С.А. Шутов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – № 1 (193). – С. 27–42.
133. Морозов, А.Н. Течения в верхнем слое моря по данным ADCP-наблюдений с океанографической платформы / А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко, С.А. Шутов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – № 28. – С. 51–61.
134. Морской портал МГИ. Архив данных по Черному морю. – [Электронный ресурс] URL: http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml (Последнее обращение 28.07.2020).

135. Нечаев, С.С. Моделирование восстановления структуры гидрофизических полей Черного моря после прохождения квазитропического циклона / С.С. Нечаев, Н.В. Маркова., С.Г. Демышев, М.В. Шокуров // Тезисы I Всероссийской научной конференции школьников, студентов и молодых ученых «Морские исследования и рациональное природопользование». – Севастополь: Филиал МГУ в г. Севастополе, 2018. – С. 143–145.

136. Нечаев, С.С. Формирование особенностей структуры гидрофизических полей в глубинных слоях Черного моря при прохождении аномального циклона / С.С. Нечаев, Н.В. Маркова., С.Г. Демышев, М.В. Шокуров // Моря России: методы, средства и результаты исследований. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. – С. 74–75.

137. Новицкий, В.П. Вертикальное строение водной толщи и общие черты циркуляции вод Черного моря / В.П. Новицкий // Тр. АзЧерНИРО. – 1964. – Вып. 23. – С. 3–22.

138. Островский, А.Г. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции / А.Г. Островский, А.Г. Зацепин, В.А. Соловьев [и др.] // Океанология. – 2013. – Т.53, № 2. – С. 1–10.

139. Павлушин, А.А. Влияние сезонной изменчивости завихренности ветра на структуру циркуляции в Черном море / А.А. Павлушин, Н.Б. Шапиро, Э.Н. Михайлова // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34. – № 5 (203). – С. 373-388.

140. Петренко, Л.А. Климатические придонные течения в Черном море / Л.А. Петренко, В.М. Кушнир // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика.– 2006. – Вып. 14. – С. 477–486.

141. Пластун, Т.В. База данных течений банка данных МГИ НАНУ / Т.В. Пластун // Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей. Сб. научн. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 153–154.

142. Полонский, А.Б. Изменения сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море / А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 1. – С. 16–31.

143. Ратнер, Ю.Б. Сопоставление скоростей течений в акватории Черного моря, полученных по результатам модельных расчетов со средними скоростями дрейфа буев-профиломеров Арго / Ю.Б. Ратнер, А.Л. Холод // Моря России: методы, средства и результаты исследований. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. – С. 66.

144. Ретроспективный анализ и исследование изменчивости гидрологических полей Черного моря: Отчет о НИР (итоговый) / РФФИ, грант № 16-05-00621_А, рук. Г.К. Коротаев.– Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016. – 45 с. – [Электронный ресурс] URL: <https://esu.citis.ru/ikrbs/HXPPPCGC7IFIQQ8XCAQVMCXD> (Последнее обращение 21.08.2020)

145. Рябцев, Ю.Н. О механизме циклонической циркуляции Черного моря / Ю.Н. Рябцев, Н.Б. Шапиро // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 2 – С. 3–13.

146. Саркисян, А.С. Численная модель и расчет течений в Черном море / А.С. Саркисян, Т.З. Джиоев // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 3. – С. 70–76.

147. Сендеров, М.В. Анализ глубинной циркуляции по результатам расчетов моделей МГИ и NEMO / М.В. Сендеров, Н.В. Маркова, О.А. Дымова // Тезисы докладов всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. – С. 122–123.

148. Смирнов, Г.В. Океанологическое приборостроение / Г.В. Смирнов // Вестник Российской академии наук. – 1997. – Т. 67, № 12. – С. 1124–1128.

149. Титов, В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море / В.Б. Титов // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 4. – С. 67–73.

150. Титов, В.Б. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря / В.Б. Титов, О.И. Прокопов // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 4. – С. 67–73.

151. Трухчев, Д.И. Гидродинамический диагноз климатических полей температуры, солености и течений в Черном море / Д.И. Трухчев, А.С. Саркисян // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 31, № 6. – С. 809–819.

152. Трухчев, Д.И. Результаты исследования климата Черного моря с использованием данных гидрологических наблюдений / Д.И. Трухчев, Ю.Л. Демин, Г.С. Дворянинов // Морской гидрофизический журнал. – 1993. – № 5. – С. 51–64.

153. Филиппов, Д.М. Циркуляция и структура вод Черного моря / Д.М. Филиппов. – М.: Наука, 1968. – 136 с.

154. Филиппов, Д.М. Существуют ли глубинные течения в Черном море? / Д.М. Филиппов // Природа. – 1969. – № 12. – С. 101–103.

155. Фомин, Л.М. Теоретические основы динамического метода и его применение в океанологии / Л.М. Фомин. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – 192 с.

156. Экспериментальный Центр Морских Прогнозов МГИ. – [Электронный ресурс] URL:<http://innovation.org.ru/> (Последнее обращение 10.09.2020).

157. Юровская, М.В. Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения / М.В. Юровская, В.А. Дулов, И.Е. Козлов // В книге: Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология. Тезисы докладов научной конференции. – Севастополь: МГИ, 2016. – С. 97.

158. Яровая, Д.А. Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование / Д.А. Яровая, В.В. Ефимов, М.В. Шокуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 3. – С. 41–55.

159. ARGO Data Management. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.ARGOfdatamgt.org/> (Последнее обращение 20.09.2020 г.).

160. Bank of Oceanographic Data of Marine Hydrophysical Institute. – [Электронный ресурс] URL: <http://bod-mhi.ru> (Последнее обращение 20.06.2020 г.)

161. Bergen Ocean Model (BOM). – [Электронный ресурс] URL: <https://org.uib.no/bom/> (Последнее обращение 25.08.2020 г.).
162. Blunberg, A.F. A description of three dimensional coastal ocean circulation model / A.F. Blunberg, G.L. Mellor // *Coastal and Estuarine Science*. – 1987. – V. 4. – P. 1–16.
163. Burchard, H. GETM – a general estuarine transport model. Scientific documentation. / H. Burchard, K. Bolding // Technical report, EUR20253EN, European Commission, Ispra, Italy. – 2002.
164. Copernicus Marine Environment Monitoring Service / Black Sea Physics Reanalysis. – [Электронный ресурс] URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=BLKSEA_REANALYSIS_PHYS_007_004 (Последнее обращение 29.07.2020 г.)
165. Dee, D.P. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system / D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons [et al.] // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2011. – 137(656) – P. 553–597.
166. Demin, Yu.L. A numerical method of the calculation of currents and sea surface topography in multiply connected domains of the ocean / Yu.L. Demin, R.A. Ibraev // *Sov. J. Num. Anal. Math. Modelling*. – 1989. – V. 4, № 3. – P. 211–225.
167. 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. – 19(1). – P. 1–12.
168. Demyshev, S.G. Numerical analysis of the Black Sea currents and mesoscale eddies in 2006 and 2011 / S.G. Demyshev, O.A. Dymova // *Ocean Dynamics*. – 2018. – 68(10). – P. 1335–1352.
169. 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.

170. Demyshev, S. The MyOcean Black Sea from a scientific point of view / S. Demyshev, V. Knysh, G. Korotaev [et al.] // Mercator Ocean Quarterly Newsletter. – 2010. – № 39. – P. 16–24. – [Электронный ресурс] URL: http://marine.copernicus.eu/wp-content/uploads/2016/06/r63_9_quarterly_letter_issue_39.pdf (Последнее обращение 20.09.2020 г.).
171. Dorofeev, V.L. Analysis of variability of the Black Sea hydrophysical fields in 1993–2012 based on the reanalysis results / V.L. Dorofeev, L.I. Sukhikh // Phys. Oceanogr. – 2016. – № 1. – P. 33–47.
172. Dorofeev, V.L. Modeling of long-term evolution of hydrophysical fields of the Black Sea / V.L. Dorofeev, L.I. Sukhikh // Oceanology. – 2017. – 57(6). – P. 784–796.
173. Dorofeev, V.L. Study of the Black Sea dynamics on the basis of reanalysis results / V.L. Dorofeev, L.I. Sukhikh // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012142. – doi :10.1088/1742-6596/1128/1/012142.
174. Dymova, O.A. Deep-water mesoscale countercurrents in the Black Sea circulation structure / O.A. Dymova, N.V. Markova // Proceeding of the international conference «Fluxes and structures in fluids». – Vladivostok: V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, 2018. – P. 76–78.
175. Dymova, O.A. Modeling the Black Sea Circulation with ERA-Interim Forcing in Summer 2013 / O.A. Dymova, N.A. Miklashevskaya, N.V. Markova // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). – Springer, 2019. – P. 33–40. – doi: 10.1007/978-3-030-11533-3_4.
176. Eremeev, V.N. Reconstruction of oceanic flow characteristics from quasi Lagrangian data: Characteristics of the large-scale circulation in the Black Sea / V.N. Eremeev, L.M. Ivanov, A.D. Kirwan Jr. [et al.] // J. Geophys. Res. – 1992. – Vol. 97 (C6). – P. 9743–9753.
177. Farda, A. Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe / Farda A., Déué M., Somot S. [et al.] // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2010. – V. 54, ¹ 2. – P. 313–332.

178. Francis, P.A. Structure and dynamics of undercurrents in the western boundary current of the Bay of Bengal / P.A. Francis, A.K. Jithin, A. Chatterjee [et al.] // *Ocean Dyn.* – 2020. – 70, – P. 387–404.

179. Global Ocean Data Assimilation Experiment / USGODAE, ARGO Page. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.usgodaе.org/argo/argo.html> (Последнее обращение 27.12.2019 г.).

180. Grayek, S. Assessment of the Black Sea observing system. A focus on 2005 – 2012 ARGO campaigns / S. Grayek, E.V. Stanev // *Ocean Dyn.* – 2015. – 65, Issue 12. – P. 1665–1684.

181. Ichikawa, Y. Estimation of Drifting Velocity and Error at Parking Depth for the Argo Float / Y. Ichikawa, Y. Takatsuki, K. Mizuno [et al.]. – [Электронный ресурс] URL: http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/ancient/results/data_management/management/driftinг_velocity/Driftinг.pdf (Последнее обращение: 12.09.2020 г.).

182. 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

183. Kara, A.B. Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales / A.B. Kara, H.E. Hurlburt, A.J. Wallcraft // *Journal of Climate.* – 2005. – V. 18. – P. 5266–5285.

184. Kobayashi, T. Quality control of Argo surface trajectory data considering position errors fixed by Argos system / T. Kobayashi, T. Nakamura, N. Ogita [et al.] // *Proc. of the OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference (Annex) (Venice, Italy, 21–25 September 2009)* / Eds. J. Hall, D.E. Harrison and D. Stammer. – ESA Publication WPP-306. – doi: 10.5270/OceanObs09.

185. Korotaev, G. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats / G. Korotaev, T. Oguz, S. Riser // *Deep-Sea Res. II: Topical Studies in Oceanography.* – 2006. – 53, № 17–19. – P. 1901–1910.

186. Korotaev, G.K. Reanalysis of seasonal and interannual variability of Black Sea fields for 1993–2012 / G.K. Korotaev, V.V. Knysh, P.N. Lishaev [et al.] // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 2016. – 52(4). – P. 418–430.

187. Korotaev, G.K. Three-dimensional climate of the Black Sea / Korotaev G.K., Demyshev S.G., Knysh V.V. // *Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting. Operational Database Management System. NReport of the Workshop and Project Evaluation Meeting – Istanbul, May, 15–16, 2000.* – Erdemli: IMS METU, 2000. – P. 1–20.

188. Korotaev, G.K. Operational system for diagnosis and forecast of hydrophysical characteristics of the Black Sea / G.K. Korotaev, Y.B. Ratner, M.V. Ivanchik [et al.] // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2016. – 52(5). – P. 542–549.

189. Kubryakov, A. Reconstructing Large- and Mesoscale Dynamics in the Black Sea Region from Satellite Imagery and Altimetry Data – A Comparison of Two Methods / A. Kubryakov, E. Plotnikov, S. Stanichny // *Remote Sensing.* – 2018. – 10, № 2. – P 239–246.

190. Lebedev, K.V. YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of ARGO floats at parking level and at the sea surface / K.V. Lebedev, H. Yoshinari, N.A. Maximenko, and P.W. Hacker // *IPRC Technical Note.* – 2007. – № 4 (2), June 12. – 16 p.

191. Madec, G. NEMO reference manual, ocean dynamics component / G. Madec // ISSN 1288-1619, Note du pôle de modélisation IPSL № 27, France, – January 2016.

192. Markova, N. Main Features of the Black Sea Mesoscale Circulation / N. Markova // *Proceedings of the International Conference on the Dynamics of Coastal Zone of Non-tidal Seas (Baltiysk, Russia, 30 June – 04 July, 2008).* – IO RAS, 2008. – P. 204–206.

193. Markova, N.V. Numerical Simulations of the Black Sea Hydrophysical Fields Below the Main Pycnocline: Validation by ARGO Data / Markova N.V., Dymova O.A., Demyshev S.G. / *Springer Proceedings in Earth and Environmental*

Sciences. Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). – Springer, 2019. – P. 15–21. – doi: 10.1007/978-3-030-11533-3_2.

194. Markova, N.V. On the Black Sea deepwater circulation features derived from numerical modeling and measurement data / N.V. Markova // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 899 (2017) 052011. – doi :10.1088/1742-6596/899/5/052011.

195. Markova, N.V. Variability of the Black Sea deep-water circulation based on hydrophysical reanalysis results / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012145. – doi :10.1088/1742-6596/1128/1/012145.

196. Markova, N.V. Velocities of the Black Sea deep currents estimated from the profiling drifters ARGO data / N.V. Markova, A.V. Bagaev // Physical Oceanography. – 2016. – № 3. – P. 23–35.

197. Mellor, G.L. Development of a turbulence close model for geophysical fluid problems / G.L. Mellor, T. Yamada // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – Vol. 20. – P. 851–875.

198. Menna, M. Mediterranean intermediate circulation estimated from Argo data in 2003–2010 / M. Menna, P.M. Poulain // Ocean Sci. – 2010. – № 6. – P. 331–343.

199. Milanova, M. Deep Black Sea circulation described by Argo profiling floats / M. Milanova , E. Peneva // Annual of Sofia University St. Kliment Ohridski, Faculty of Physics. – 2016 – № 109. – 12 p.

200. Morozov, A.N. Methodical Aspects of the Application of Acoustic Doppler Current Profilers in the Black Sea / A.N. Morozov, E.M. Lemeshko // Physical Oceanography. – 2006. – 16. № 4. – P. 216–233.

201. Murray, J.W. The 1988 Black Sea Oceanographic Expedition: Overview and new discoveries / J.W. Murray, E. Izdar // Oceanography. – 1989. – V. 2(1). – P. 15–21.

202. Murray, J.W. Black Sea oceanography: Results from the 1988 Black Sea Expedition / J.W. Murray // Deep Sea Res. – 1991. – Vol. 38, Suppl. 2A. – 1266 pp.

203. Neumann, G. Uber den Aufbau und die Frage der Tiefenzirkulation des Schwarzen Meeres / G. Neumann // *Ann. Hydrogr. und marit. Meteorol.* – 1943. – Bd.71 (1), № 4/6. – P. 1–20.
204. NonHydrostatic SKIRON / Eta Modelling System page. – [Электронный ресурс] URL:<http://forecast.uoa.gr/forecastnewinfo.php> (Последнее обращение 18.07.2018).
205. Oguz, T. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea / T. Oguz, V.S. Latun, M.A. Latif [et al.] // *Deep-Sea Res.* – 1993. – 40, № 8. – P. 1597–1612.
206. Oguz, T. Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during Hydroblack 1991 / T. Oguz, D.G. Aubrey, V.S. Latun [et al.] // *Deep-Sea Res.* – 1994. – Vol. 1 (41). – P. 603–628.
207. Oguz, T. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing / T. Oguz, P. Malanotte-Rizzoli, D. Aubrey // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100. – P. 6845–6863.
208. Pacanowski, R.C. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans / R.C. Pacanowski, S.G.H. Philander // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11, № 11. – P. 1443–1451.
209. Park, J.J. Deep currents obtained from ARGO float trajectories in the Japan/East Sea / J.J. Park, K. Kim // *Deep-Sea Res. II: Topical Studies in Oceanography.* – 2013. – 85, January 2013. – P. 169–181.
210. Peneva, E.L. Numerical simulations of Black Sea and adjoined Azov Sea, forced with climatological and meteorological reanalysis data / E.L. Peneva, A.K. Stips // Technical report, EUR21504EN, European Commission, Ispra, Italy. – 2005. – 91 p. – doi: 10.13140/RG.2.1.1830.4722.
211. Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research numerical model (MM5) home page. – [Электронный ресурс] URL: <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/> (Последнее обращение 28.08.2020).

212. Riser, S.C. Fifteen years of ocean observations with the global ARGO array / S.C. Riser, H.J. Freeland, D. Roemmich et al. // *Nat. Clim. Change.* – 2016. – 6, № 2. – P. 145–153.
213. Rosell-Fieschi, M. Ocean Velocities as Inferred from ARGO Floats: Methodology and Applications / M. Rosell-Fieschi // PhD Thesis. – Institut de Ciències del Mar, CSIC. – 2014. – June 24. – 121 p.
214. Stanev, E.V. Numerical simulations of seasonal and interannual variability of the Black Sea thermohaline circulation / E.V. Stanev, J.-M. Beckers // *J. Mar. Syst.* – 1999. – Vol. 22. – P. 241–267.
215. Stanev, E.V. Numerical study on the planetary Rossby modes in the Black Sea / E.V. Stanev, N.H. Rachev // *J. Marine Syst.* – 1999. – Vol. 21. – № 1–4. – P. 283–306.
216. Staneva, J.V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black sea / J.V. Staneva, E.V. Stanev // *Oceanologia.* – 1998. – 21(3). – P. 383–417.
217. Stanichny, S.V. Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind, and altimetry data / S.V. Stanichny, A.A. Kubryakov, D.M. Soloviev // *Ocean Dynamics.* – 2016. – 66, № 1. – P. 1–10.
218. Sutherland, D.A. A model study of the Salish Sea estuarine circulation / D.A. Sutherland, P. MacCready, N.S. Banas, L.S. Smedstad // *Journal of Physical Oceanography.* – 2011. – V. 41. – P. 1125–1143.
219. Thomas, L.N. Submesoscale processes and dynamics / L.N. Thomas, A. Tandon, A. Mahadevan // *Ocean Modeling in an Eddying Regime. Geophysical monograph series. Oceanography – Mathematical models.* – Washington, D.C.: American Geophysical Union. – 2008. – 177. – P. 17 – 38. – doi:10.1029/177GM04
220. Trukhchev, D.I. Seasonal variability of the Black Sea climatic circulation / D.I. Trukhchev, R.A. Ibrayev // *Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and Northern Sea* / edit. E. Ozsoy, A. Mikaelyan. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. – P. 365–374.

221. Whitehead, J.A. Convective circulation in mesoscale abyssal basins / J.A. Whitehead, G.K. Korotaev, S.N. Bulgakov, // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. – 1998. – 89. – P. 169–203.

222. Zalesny, V.B. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov / V.B. Zalesny, N.A. Diansky, V.V. Fomin [et al.] // Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling. – 2012. – V. 27, № 1. – P. 95–111.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ИНФОРМАЦИЯ О ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ
ТЕЧЕНИЙ

Таблица А.1 – Сведения о глубоководных станциях измерения скорости течений из БОД МГИ [182] и осредненные значения параметров течений

№ станции месяц и год выпол- нения	НИС, № рейса	Вид прибора, дискрет- ность измере- ний	Глубина, м	Кол-во измере- ний, ед.	Преоб- ладаю- щее направ- ление, град	Медиана скорости см/с	Третий квартиль скорости см/с	Средняя скорость см/с	СКО, см/с
1 08.1975	–	БПВ; 15 мин	15	621	194	32	41	35	10
			500	1308	240	5	7	6	2
			750	1287	243	4	4	4	1
			1000	1308	235	2	2	2	1
2 08.1975	–	БПВ; 15 мин	15	794	77	7	12	10	6
			500	1028	94	3	6	5	3
			750	1031	244	7	10	8	5
			1 000	1031	152	4	6	5	2
3 08.1975	–	БПВ; 15 мин	15	292	240	13	17	14	5
			1000	131	93	2	6	5	5
4 10.1960	МЛ, 49_1	МГИ- 1301, Диск; 1 ч	500	439	*	*	*	*	*
			750	442	*	*	*	*	*
			1000	442	*	*	*	*	*
5 03.1988	МЛ, 9	БПВ; 10 мин	10	278	252	5	8	7	4
			500	283	221	8	9	8	2
			1000	289	110	12	15	12	3
6 10.1960	МЛ, 49_1	БПВ; 1 ч	500	552	*	*	4	*	*
			1000	570	*	*	*	*	*
7 03.1988	МЛ, 9	БПВ; 10 мин	10	139	272	6	12	9	6
			500	143	217	4	4	4	1
			1000	143	95	12	14	12	2
8 10.1960	МЛ, 49_1	МГИ- 1301, Диск; 1 ч	500	260	*	*	*	*	*
			750	261	*	*	*	*	*
			1000	183	*	*	*	*	*
9 03.1988	МЛ, 9	БПВ; 10 мин	500	250	239	8	9	8	2
			1000	250	200	8	9	8	2
10 03.1988	МЛ, 9	БПВ; 10 мин	500	229	251	8	9	8	2
			1000	233	140	9	10	8	2
11 08.1975	–	БПВ; 10 мин	1000	282	205	7	8	7	2

Продолжение Таблицы А.1

№ станции месяц и год выпол- нения	НИС, № рейса	Вид прибора, дискрет- ность измере- ний	Глубина, м	Кол-во измере- ний, ед.	Преоб- ладаю- щее направ- ление, град	Медиана скорости см/с	Третий квартиль, скорости см/с	Средняя скорость см/с	СКО, см/с
12 09.1991	ТР, 3	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	10	6208	292	9	16	13	9
			500	4827	255	15	24	19	15
13 09.1991	ТР, 3	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	10	3665	89	10	16	13	9
			500	4839	260	35	44	35	14
14 09.1991	ТР, 2	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	10	2121	256	10	17	12	7
			500	8780	252	26	34	26	11
15 09.1992	ТР, 5	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	5	2758	299	11	18	13	8
			500	7016	278	5	7	6	3
16 09.1992	ТР, 5	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	5	280	168	4	6	5	4
			500	7019	256	3	5	6	3
17 09.1991	ТР, 3	МГИ- 1301, Диск; 10 мин	10	7102	94	9	14	12	9
			500	4567	336	27	37	28	14
18 03.1988	МЛ, 9	БПВ; 10 мин	10	277	268	11	17	14	9
			500	286	220	8	9	8	2
			1000	286	181	7	10	8	3
19 10.2016	ПВ, 89	LADCP	500	63	45	3	4	3	2
			750	11	45	8	9	8	1
20 10.2016	ПВ, 89	LADCP	500	63	67,5	4	6	4	2
			750	28	112	6	7	6	1
21 10.2016	ПВ, 89	LADCP	500	63	22,5	4	9	6	4
			750	29	22,5	12	13	12	1
22 07.2016	ПВ, 87	LADCP	10	12	224	19	20	19	1
			500	40	113	2	2	2	1
			750	58	182	3	3	3	1
23 07.2016	ПВ, 87	LADCP	10	12	200	14	15	14	3
			500	40	228	8	8	8	1
			750	50	222	3	4	3	1
24 07.2016	ПВ, 87	LADCP	10	12	85	19	20	19	2
			500	40	336	8	9	8	1
			750	39	107	4	5	4	1

Продолжение Таблицы А.1

№ станции месяц и год выпол- нения	НИС, № рейса	Вид прибора, дискрет- ность измере- ний	Глубина, м	Кол-во измере- ний, ед.	Преоб- ладаю- щее направ- ление, град	Медиана скорости см/с	Третий квартиль, скорости см/с	Средняя скорость см/с	СКО, см/с
25 07.2016	ПВ, 87	LADCP	10	11	207	17	21	17	4
			500	40	184	2	2	2	1
			750	50	191	9	10	9	1

Примечание: МЛ – НИС «Михаил Ломоносов», ТР – НИС «Трепанг», ПВ – НИС «Профессор Водяницкий». Звездочкой (*) заменены значения, для получения которых требуется использование данных наблюдений, абсолютная величина которых ниже порога чувствительности прибора-измерителя. Строки с данными на верхнем горизонте выделены серым цветом

Основные характеристики приборов-измерителей течений

Приведем основные особенности характеристики приборов, которые использовались в рейсах на НИС для измерения скорости течений [182].

БПВ – буквопечатающая вертушка (самописец) – предназначена для автоматического вычисления и регистрации направления и скорости течения [148]. Диапазон измерения скорости 2–148 см/с. Наибольшая погрешность измерений 1–2 см/с наблюдается при совпадении полосы частот канала измерения с полосой частот флуктуаций вектора скорости. Средняя погрешность – 0,5 см/с.

Долговременный измеритель скорости течения и температуры **МГИ-1301, ДИСК** является разработкой Морского гидрофизического института. Это цифровая многоканальная система с записью получаемой информации на магнитный носитель. Скорость течения измеряется в двух диапазонах: 2,5–175 см/с (чувствительность 0,7 см/с, время экспозиции 4 с) и 2,5–87 см/с (чувствительность 0,35 см/с, время экспозиции 8 с). Погрешность измерения направления составляет 5°, время осреднения направления 2–2,5 с [148].

LADCP (*Lowered Acoustic Doppler Current Profiler*) – погружной акустический доплеровский измеритель течений **WHM300** (частота 300 кГц, производство RDI). Диапазон измеряемых скоростей – до 2000 см/с, среднеквадратическое отклонение единичного измерения скорости 3 см/с. Погрешность измерения в результирующих осредненных профилях – в пределах 2 см/с [200]. Наиболее современный и точный из использовавшихся приборов измерения скорости течений.

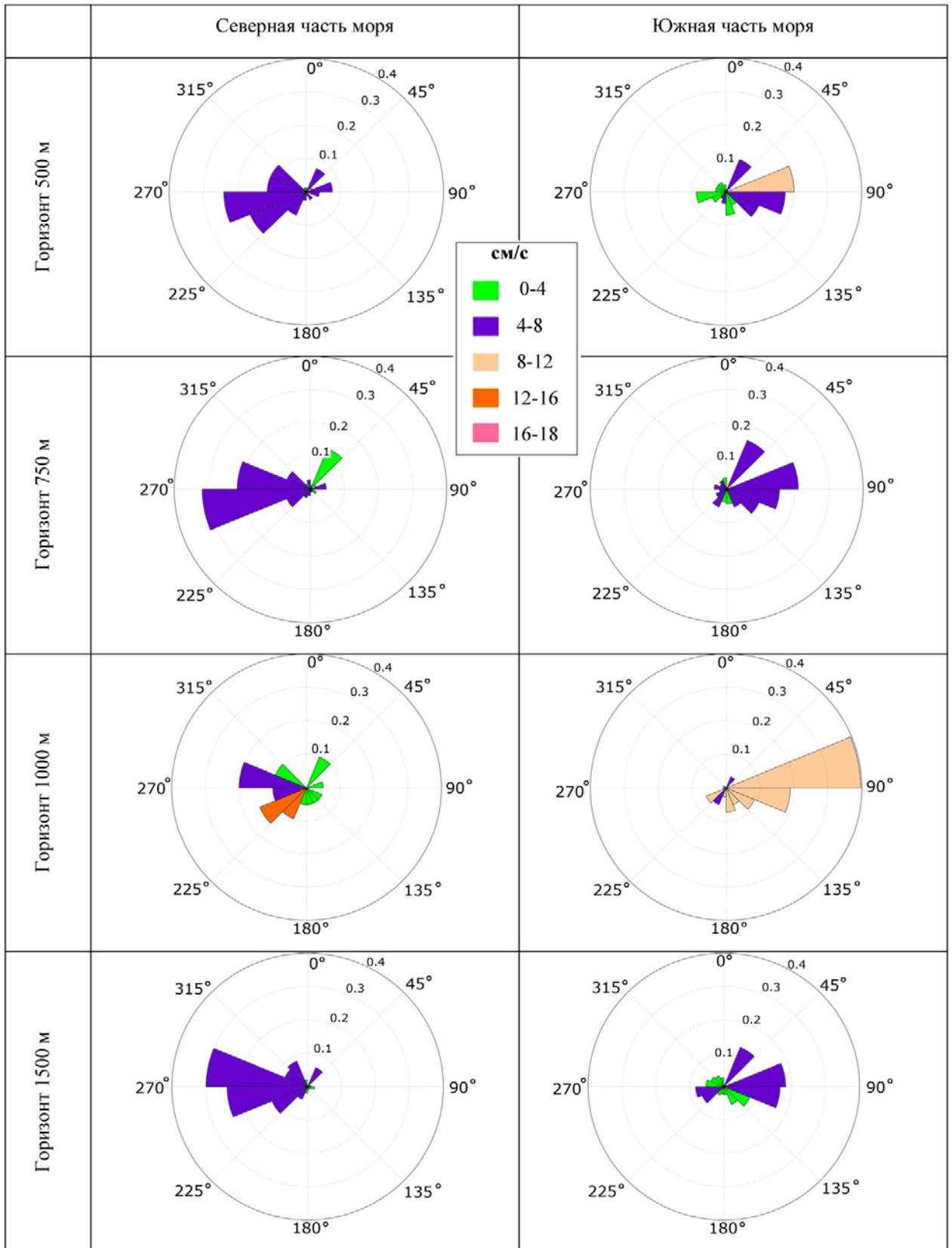


Рисунок А.1 – Направления глубоководных течений в северной и южной частях Черного моря по данным ARGO. Цветом обозначены диапазоны средней скорости, длина сектора отображает (в долях единицы) повторяемость направления

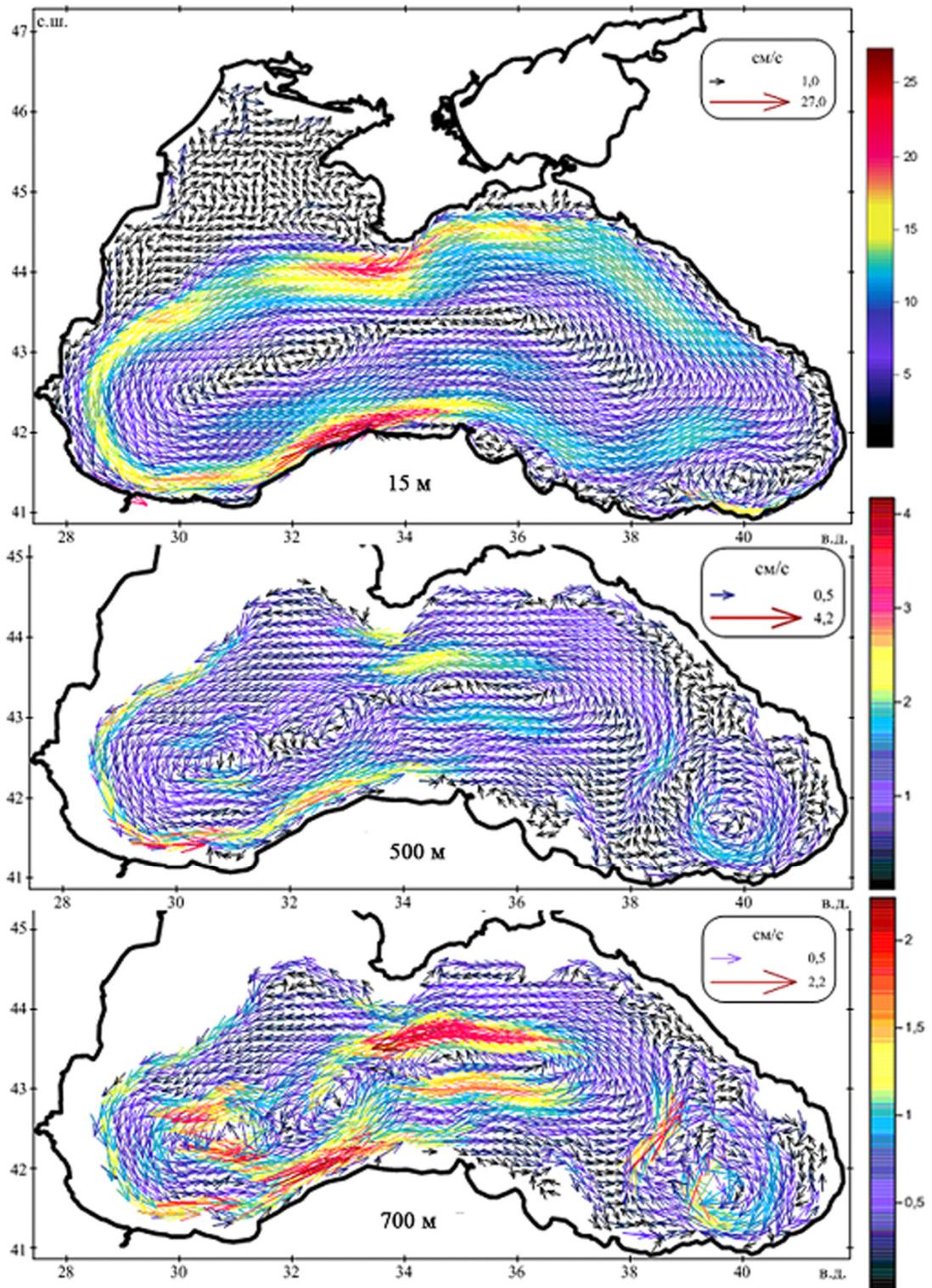
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ К РЕЗУЛЬТАТАМ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рисунок Б.1 – Средние за год поля климатических течений на горизонтах
15, 500 и 700 м

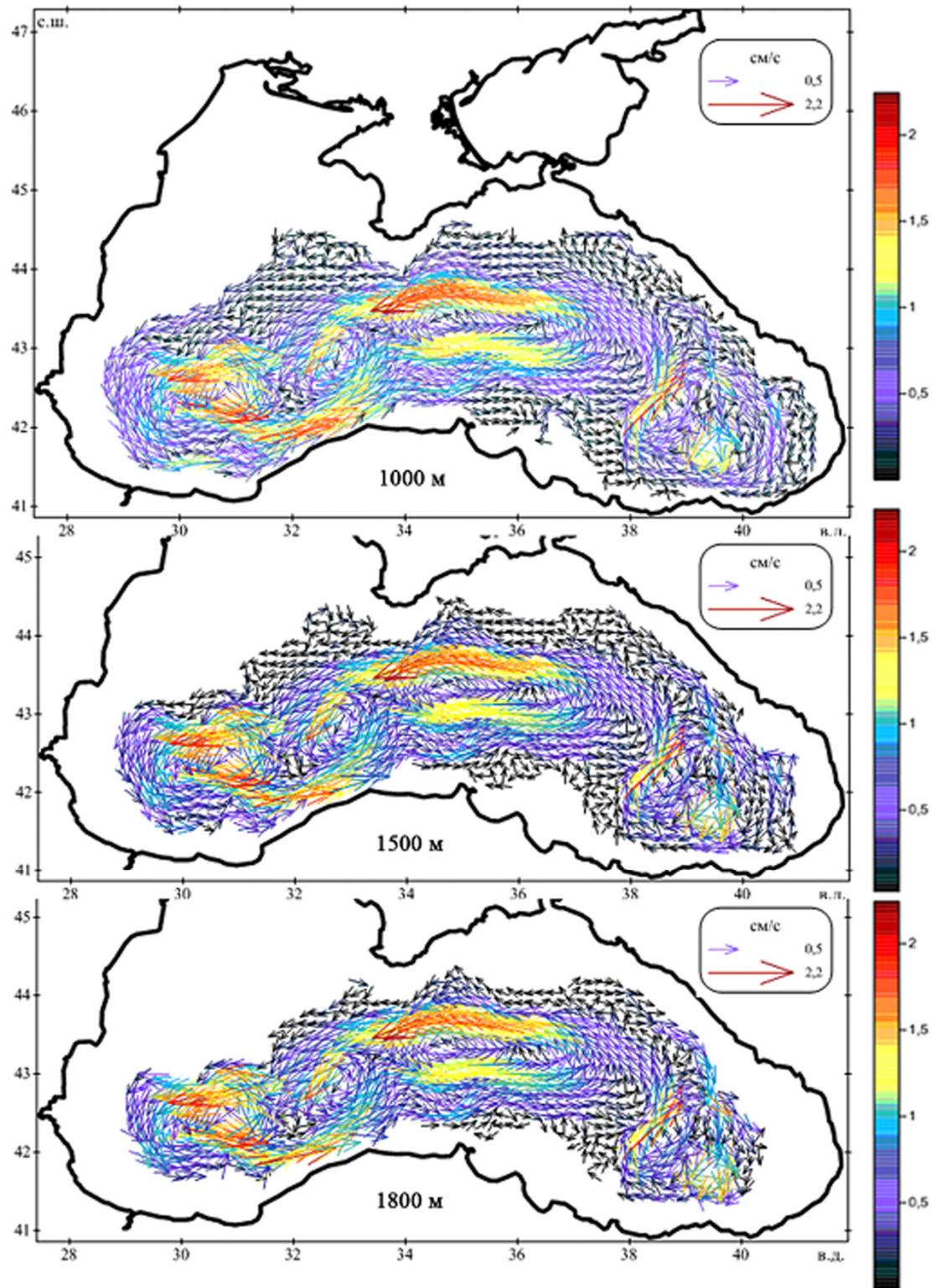


Рисунок Б.2 – Средние за год поля климатических течений на горизонтах 1000, 1500 и 1800 м

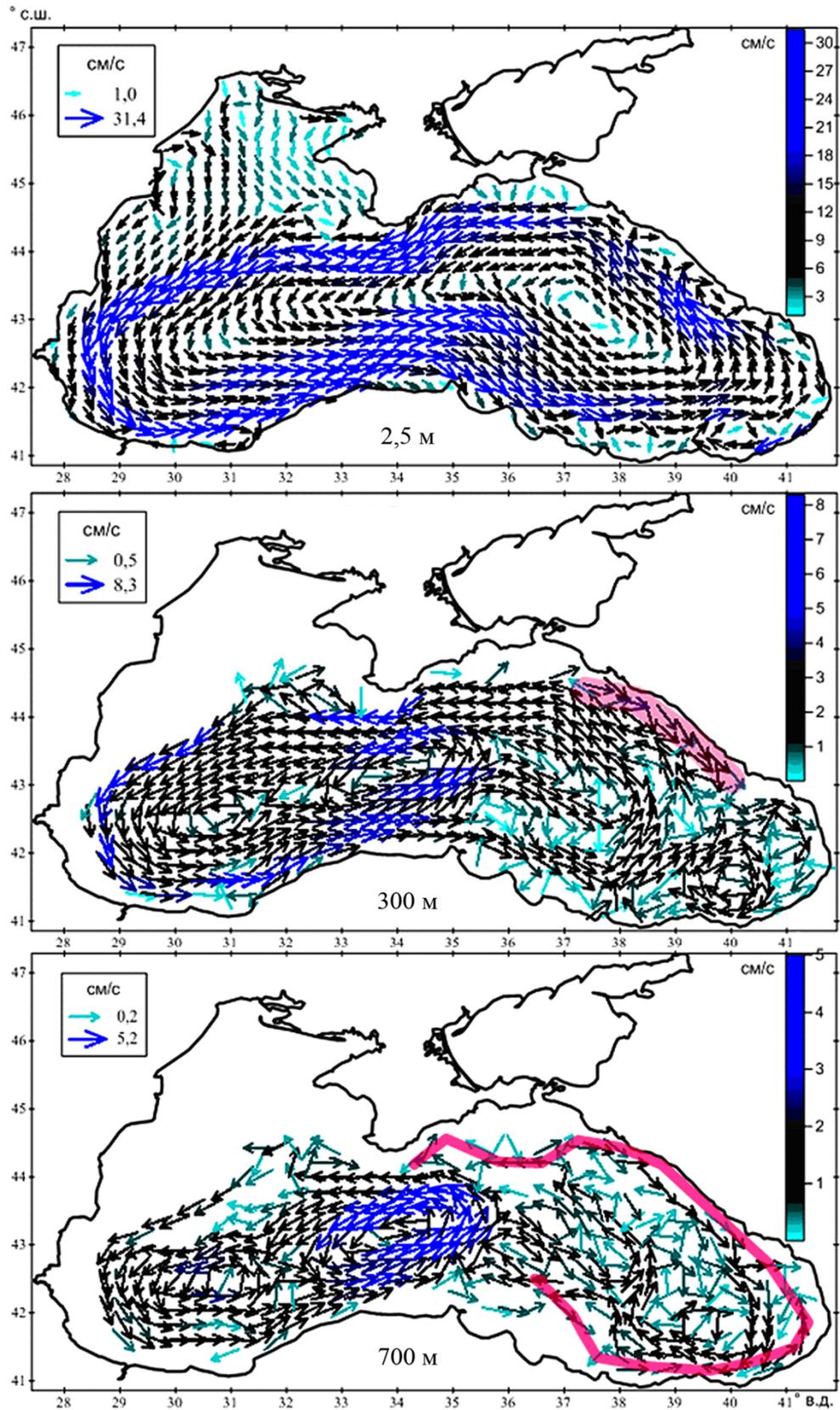


Рисунок Б.3 – Климатические течения на горизонтах 2,5, 300 и 700 м 11 апреля. Красным цветом отмечено АЦТ в восточной части моря

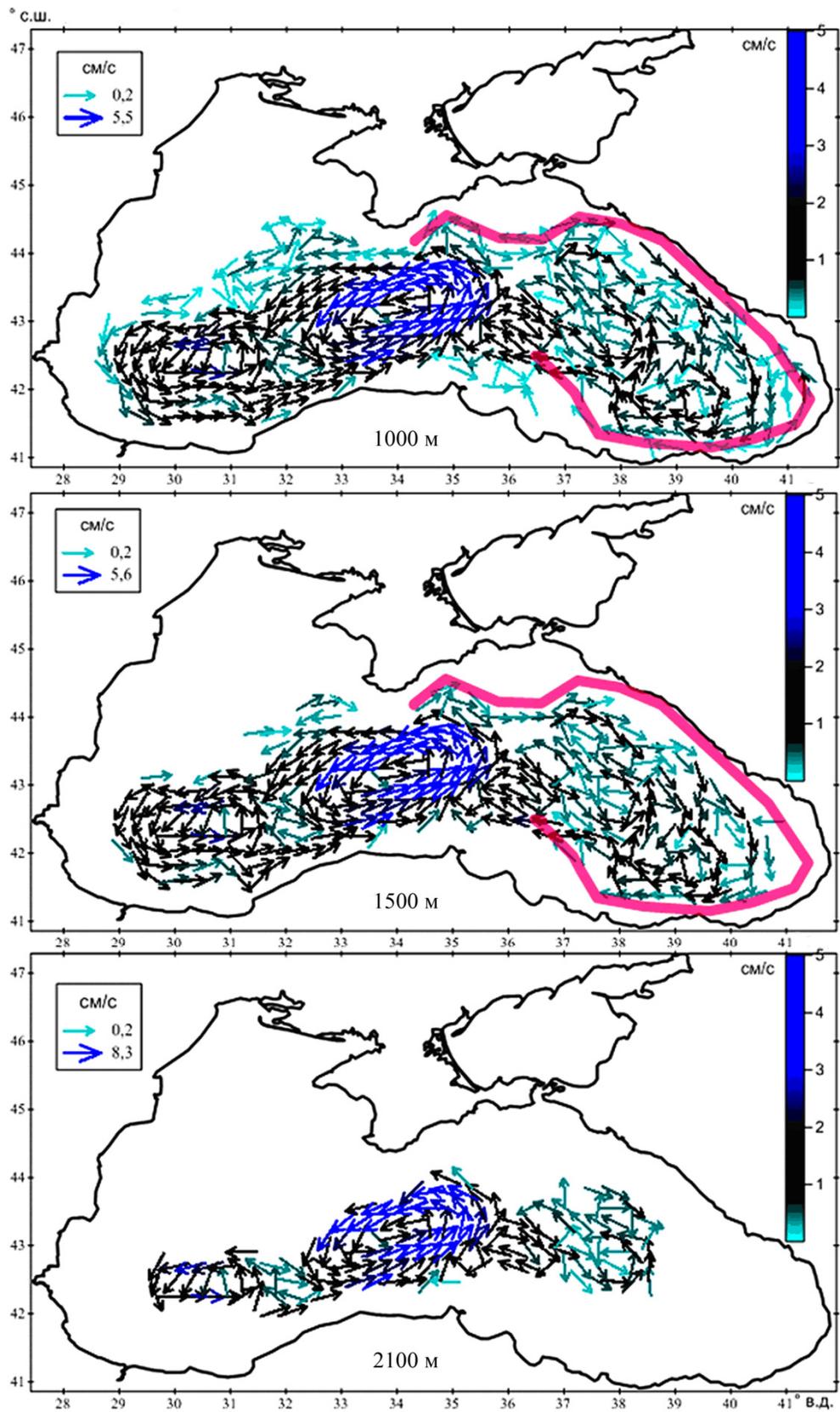


Рисунок Б.4 – Климатические течения на горизонтах 1000, 1500 и 2100 м 11 апреля. Красным цветом отмечено АЦТ в восточной части моря

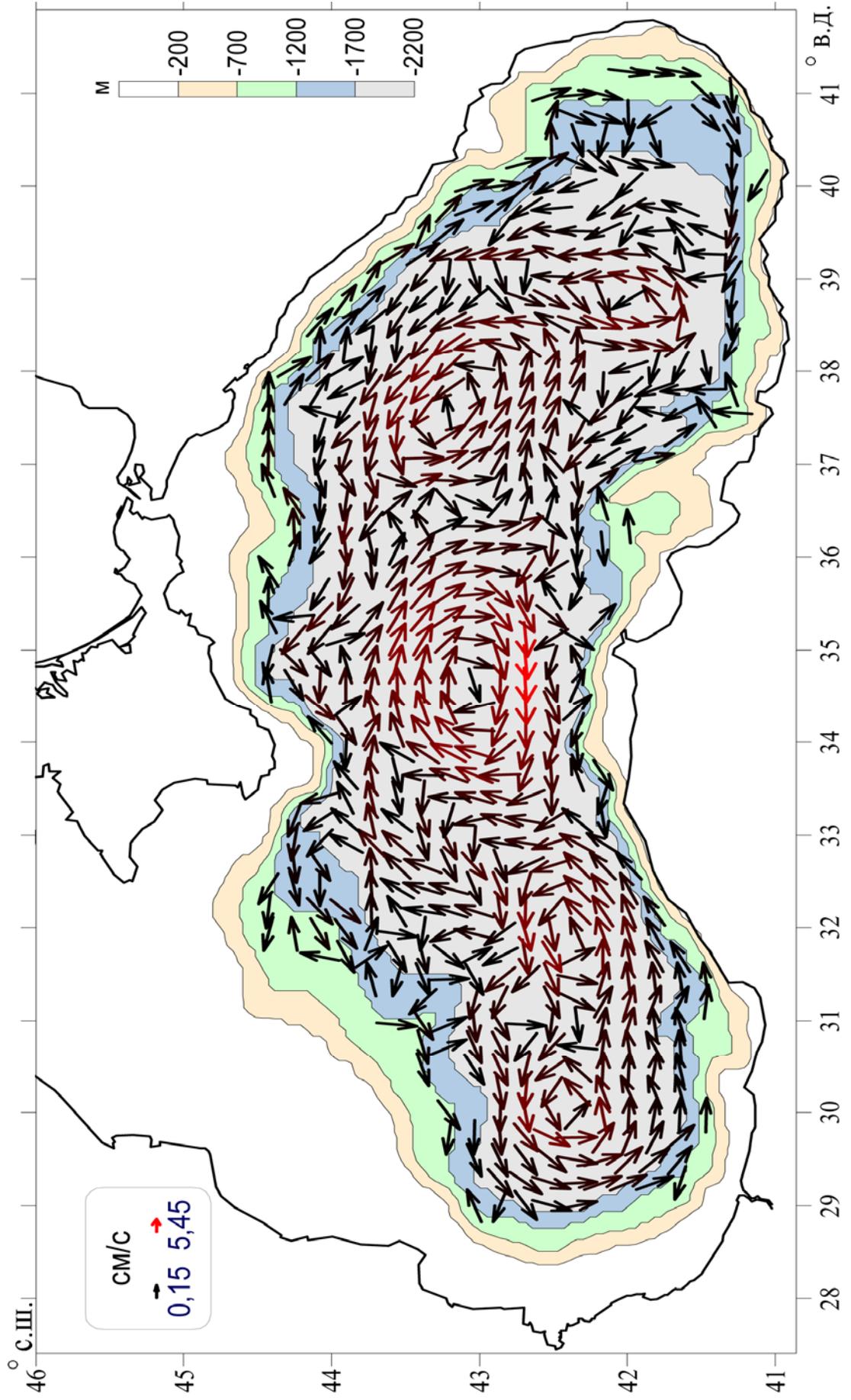


Рисунок Б.5 – Климатические течения на фоне батиметрии в период проявления АЦТ (30 мая, горизонт 1000 м)

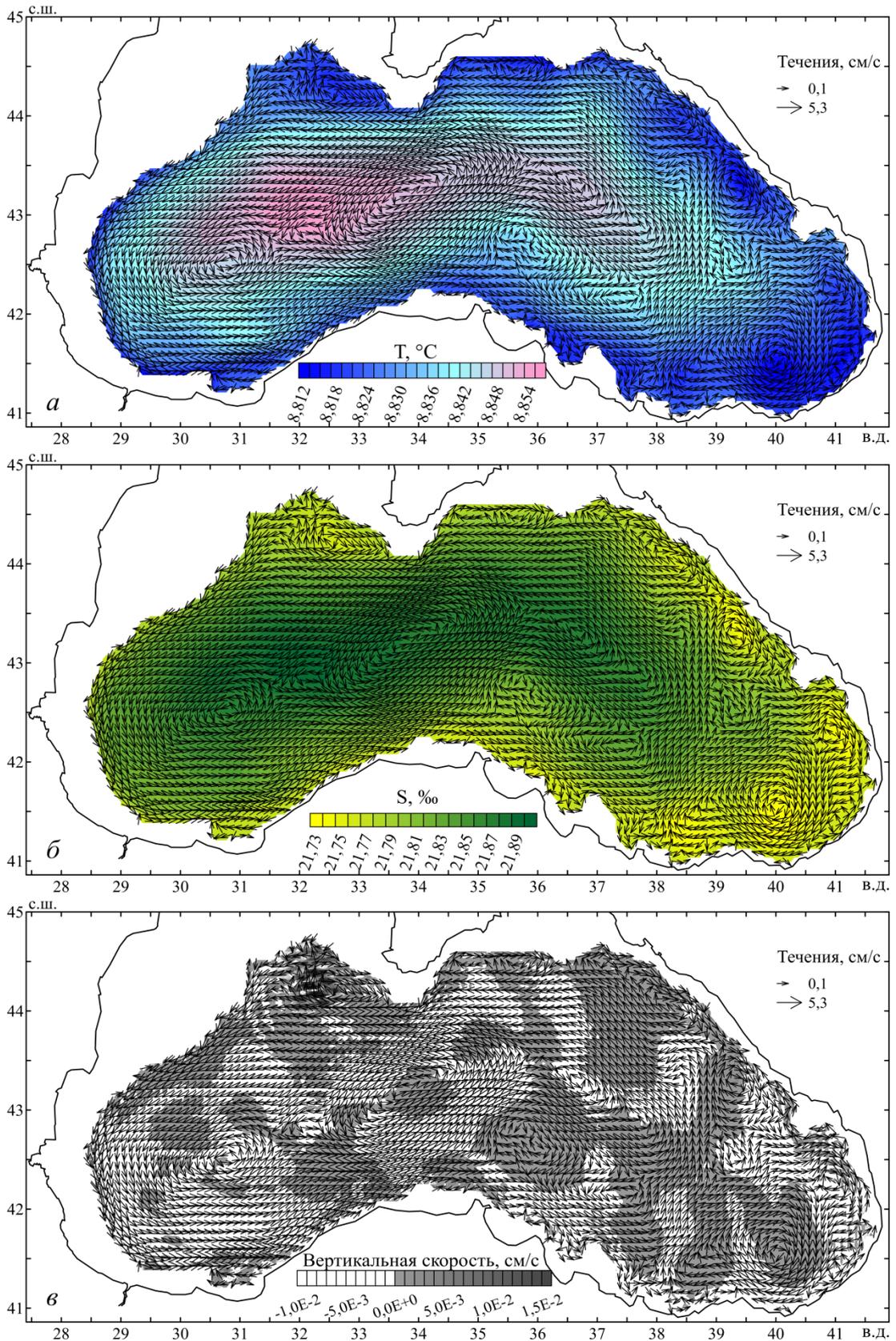
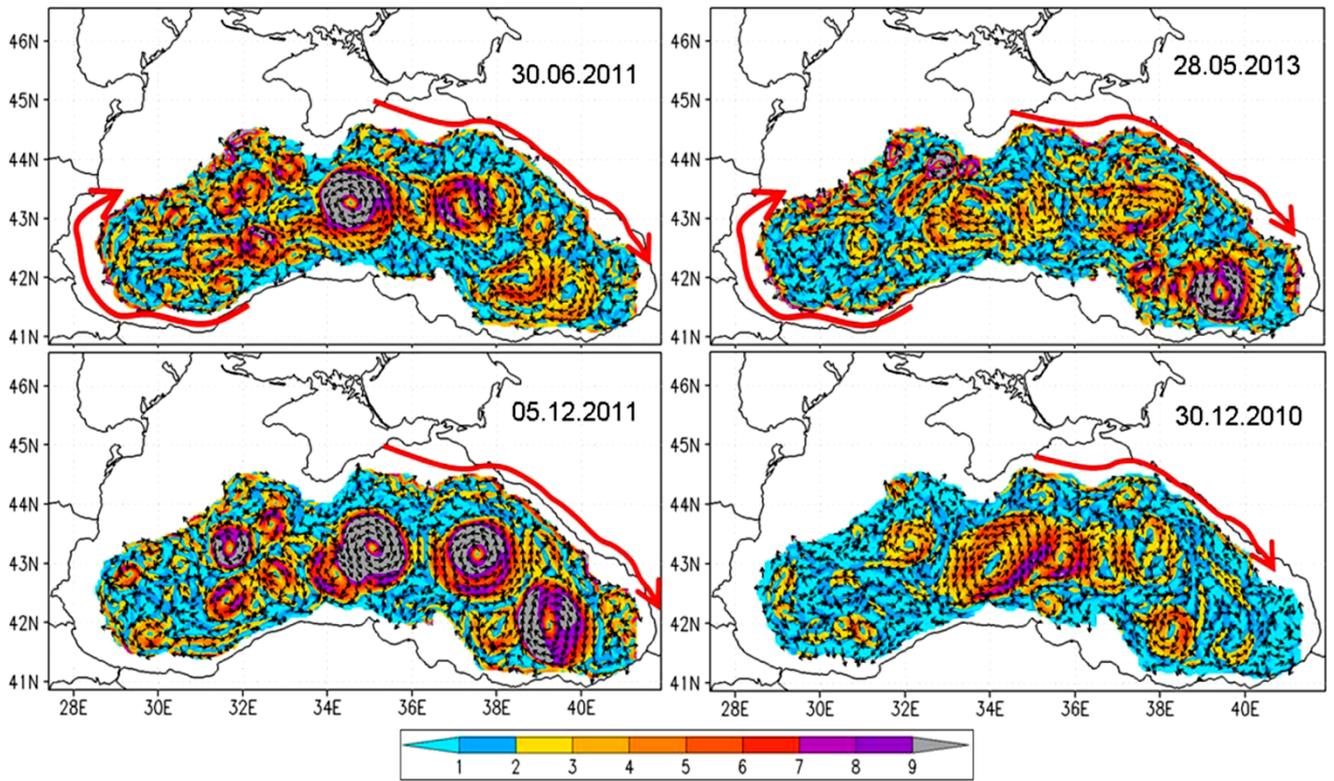
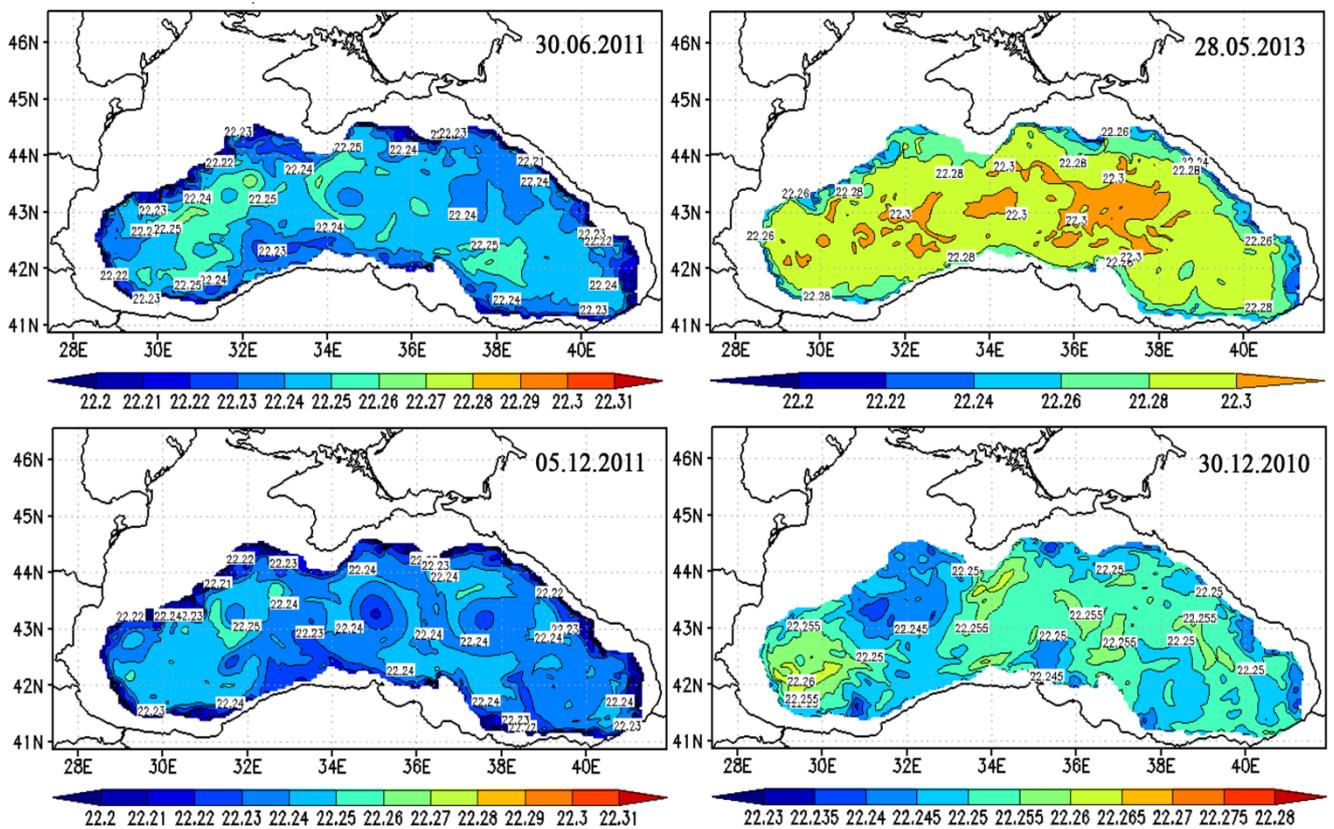


Рисунок Б.6 – Климатические поля T, S, w на фоне течений в период проявления АЦТ в северо-восточной части моря (24 апреля) на горизонте 350 м. Темная заливка на нижнем рисунке соответствует областям опускания вод ($w > 0$)



a



б

Рисунок Б.7 – Поля течений (а, см/с) и соответствующие поля солёности (б, ‰) на горизонте 1100 м в периоды проявления АЦТ, по результатам прогностических экспериментов на сетке 1,6 км с реальным атмосферным воздействием

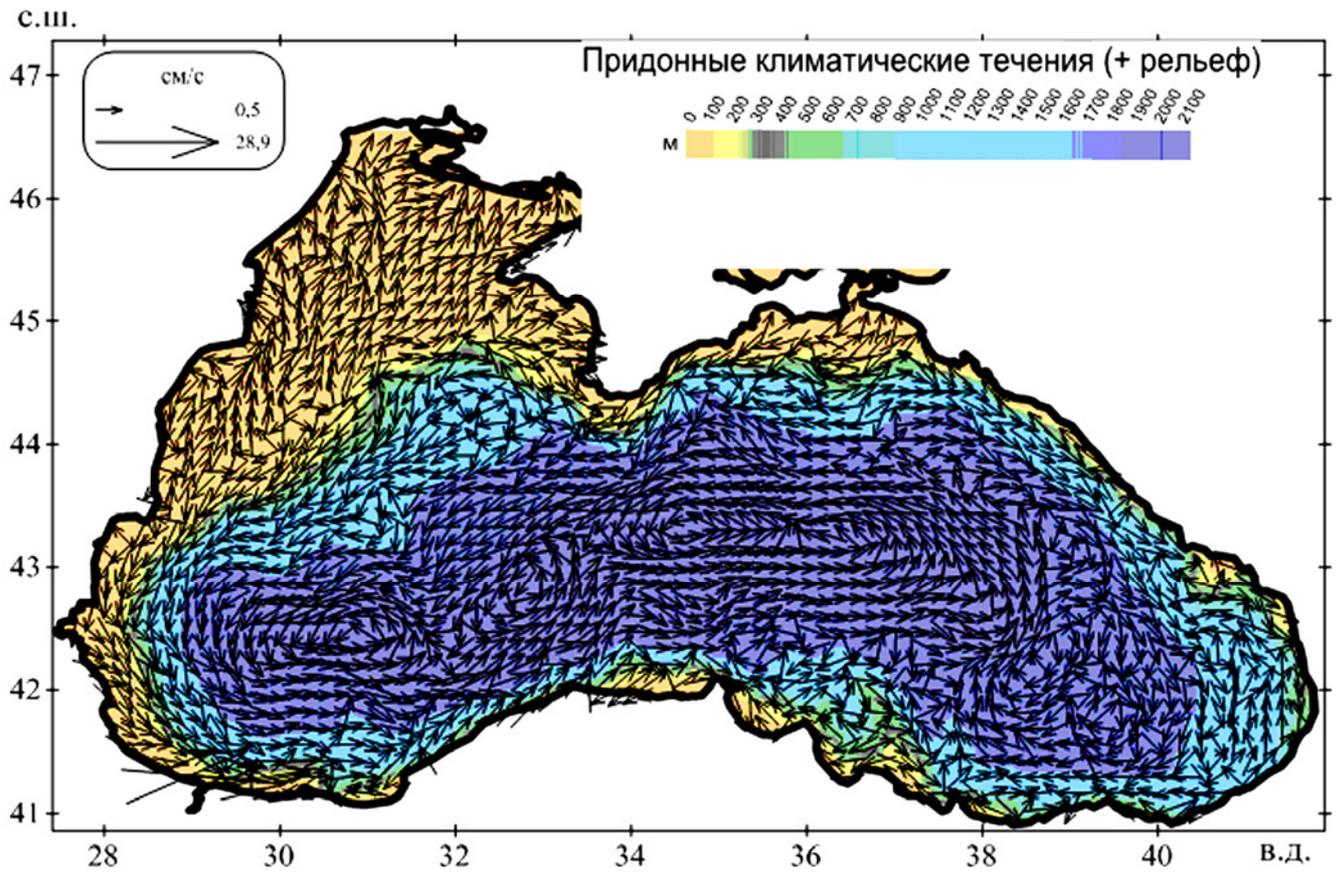


Рисунок Б.8 – Средние за год придонные климатические течения на фоне батиметрии