На правах рукописи

Лишаев Павел Николаевич

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ АЛЬТИМЕТРИИ И ОГРАНИЧЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 1.6.17. Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2024

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН **Коротаев Геннадий Константинович**

Официальные оппоненты:
Реснянский Юрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», главный научный сотрудник лаборатории исследований и моделирования морских гидрометеорологических процессов отдела морских гидрологических прогнозов

Ушаков Константин Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, старший научный сотрудник отдела крупномасштабных процессов и климата

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова»

Защита состоится 5 марта 2025 года в 11 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.229.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/thesis_defenses.html

Автореферат разослан 20 декабря 2024 года

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В настоящее время приоритетным направлением развития Оперативной океанографии является ассимиляция в моделях циркуляции вод информации о состоянии глобального океана и отдельных его составляющих, полученной контактными и дистанционными методами. Эффективная реализация данного направления Оперативной океанографии осуществлялась по международным программам GODAE и GODAE OceanView. Основной целью этих программ, помимо создания надежной глобальной оперативной системы регулярных прогнозов, является также реанализ состояния океана. Для построения такой системы используются физические модели высокого разрешения, процедуры ассимиляции данных измерений широкой сети наблюдений за состоянием океана. Модели циркуляции вод морских или океанических бассейнов при ассимиляции разнородных наблюдений позволяют оптимальным образом интерполировать измерения на регулярную в пространстве и во времени сетку с оценкой точности представляемых массивов данных расчетов. Реанализ дает возможность проводить исследования изменчивости морской среды в широком интервале пространственно-временных масштабов. Использование полученных при реанализе регулярных массивов данных позволяет воспроизводить характеристики изменчивости морской среды и исследовать механизмы ее формирования.

Для качественного воспроизведения термохалинной стратификации и мезомасштабных процессов важно усваивать данные наблюдений, равномерно распределенные по акватории исследуемого бассейна. Однако, в период с 1993 г. по настоящее время наблюдается резкое снижение количества регулярных гидрологических измерений в Черном море, что значительно усложняет проведение ретроспективного анализа. В то же время, с конца 1992 г. становится доступным новый продукт для акватории Черного моря – динамический альтиметрический уровень моря. Ассимиляция спутниковых альтиметрических наблюдений совместно с данными гидрологических зондирований в вихреразрешающих моделях циркуляции позволяет воспроизводить особенности сезонной, межгодовой и декадной изменчивости полей Мирового океана или отдельных морей.

Использование методов ассимиляции данных измерений в гидродинамических моделях океана при решении задач ретроспективного анализа обеспечивает реалистичное воспроизведение океанографических полей. В настоящее время к наиболее часто используемым методам относятся вариационное усвоение данных наблюдений *4D-Var* (Агошков и др., 2013; Gejadze et al., 2008; Залесный, Ивченко, 2015; Пененко, 2009; Пененко, 2015) и фильтр Калмана (Jazwinski, 1970; Sakava Youshiyuki, 1972; Кныш, Саркисян, 2003) в двух его разновидностях расчета матриц ковариаций ошибок прогноза: с упрощенным методом (Беляев и др., 2012; Kaurkin et al., 2016; Дорофеев, Сухих, 2016) и по ансамблю реализаций (Беляев и др., 2012; Evensen, 2003; Counillon, Bertino, 2009). Ансамблевый фильтр Калмана требует больших мощностей вычислительной техники и не всегда гарантирует получение оптимальных весовых коэффициентов (Counillon, Bertino, 2009).

В алгоритме класического дискретно-непрерывного фильтра Калмана (Jazwinski, 1970; Климова, 2001; Саркисян и др. ,1987; Кочергин и др., 1987) в промежутках между наблюдениями компоненты вектора состояния и матрица ковариаций ошибок прогнозируются с использованием матричного оператора гидродинамической модели к моменту поступления наблюдений. В моменты наблюдений прогностические значения компонентов вектора состояния корректируются взвешенными разностями между наблюдениями и интерполированными из узлов сетки в точки наблюдений прогностическими компонентами вектора состояния. Наряду с этим происходит также корректирование матрицы ковариаций ошибок (Климова, 2001). Упрощенная ковариационная функция ошибок прогноза температуры (солености) применялась в работе (Knysh et al., 2008) для разработки метода адаптивной статистики, использованного для воспроизведения климатических гидрофизических полей Черного моря. В этой работе характерные (типичные) дисперсии ошибок прогноза температуры и солености зависели только от вертикальной координаты, а дисперсии ошибок прогноза рассчитывались по однотипным дифференциальным уравнениям. Метод адаптивной статистики использовался также в статье (Мизюк, 2014) для выполнения ретроспективного анализа полей моря. В отличие от работы (Knysh et al., 2008) в статье (Мизюк, 2014) были оценены трехмерные типичные дисперсии ошибок прогноза температуры и солености по данным о среднесуточной температуре и солености реанализа за 1971–1993 гг., позволившие восстановить гидрофизические поля моря в реанализе за 1985–1993 гг. с разрешением модели 4,9×4,9 км. Однако способ оценки типичных дисперсий для реанализа за период с 1993 г. по настоящее время с учетом ограниченности в этот период данных измерений температуры и солености буями *Argo* так же, как и способ учета этих оценок в дифференциальных уравнениях дисперсий прогноза требуют уточнения.

Таким образом, в условиях оптимизации системы контактных наблюдений, а также наличия спутниковых данных с высоким пространственным и временным разрешениями, появляется необходимость создания алгоритма восстановления трехмерных полей температуры и солености с достаточной дискретностью как по времени, так и пространству, используя комбинированный анализ доступных данных, для последующего усвоения их в модели циркуляции вод Черного моря.

Объект исследования – Черное море.

Предмет исследования – ежесуточные трехмерные поля псевдоизмерений температуры и солености Черного моря, восстановленные по редким контактным наблюдениям и данным альтиметрии.

Цель работы. Восстановить и проанализировать сезонную, межгодовую, междекадную и синоптическую изменчивости гидрофизических полей Черного моря за 1993–2014 гг. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) Исследовать динамику полей температуры и солености Черного моря на основе совместного анализа данных гидрологических зондирований и альтиметрии.

2) Разработать алгоритм восстановления трехмерных ежесуточных полей псевдоизмерений температуры и солености морской воды в бароклинном слое моря на регулярной сетке за 1993–2014 гг.

3) Усовершенствовать алгоритм адаптивной статистики для ассимиляции псевдоизмерений температуры и солености в модели циркуляции моря.

4) Выполнить реанализ гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености в модели циркуляции за 1993–2014 гг.

5) Исследовать сезонную, межгодовую, междекадную и синоптическую изменчивости гидрофизических полей Черного моря за 1993–2014 гг. на основе восстановленных полей псевдоизмерений и данных реанализа.

Теоретическая и практическая значимость работы. В настоящее время контактные измерения в различных частях Мирового океана, как и в Черном море, неравномерны как в пространстве так, и во времени и не дают возможности получить цельную картину пространственной изменчивости таких полей как температура и соленость. В тоже время есть спутниковая альтиметрия, позволяющая определить уровенную поверхность моря с высоким временным разрешением. Предложенный в работе алгоритм позволяет сгладить проблему ограниченности данных контактных измерений и получать ежесуточные трехмерные поля температуры и солености с разрешением по пространству как у альтиметрических измерений, что, в свою очередь, дает возможность проводить предварительный анализ пространственной (по горизонтам, слоям и глубине) и временной изменчивости гидрофизических полей, еще до привлечения численного моделирования. Также полученные трехмерные поля псевдоизмерений обеспечивают численные модели (гидродинамические и совместные с биогеохимическими) как начальными полями, так и данными для корректировки гидрофизических полей на протяжении выполнения численного эксперимента (при ассимиляции температуры/солености), чтобы получить наиболее близкие к измерениям выходные данные.

Предложенный в диссертационной работе оригинальный алгоритм позволяет восстанавливать трехмерные ежесуточные поля псевдоизмерений температуры и солености в Черном море и схожих океанических акваториях в условиях ограниченности контактных наблюдений.

Разработана методика выполнения ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря, результаты которого могут быть использованы для анализа вихревой динамики, сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных полей с точностью сопоставимой и выше, чем у существующих на данных момент реанализов.

Предложена методология устранения модельного тренда в межгодовой изменчивости полей температуры и солености Черного моря в приложении к задачам оперативного прогноза состояния морской среды.

Методы исследования. В работе использовались современные методы численного моделирования циркуляции морей и океанов, алгоритмы усвоения данных наблюдений; валидация воспроизведенных трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености и восстановленных в реанализе проводилась посредством сопоставления с данными контактных наблюдений (буи АРГО, данные контактных измерений, полученных в ходе экспедиционных исследований, находящиеся в базе данных МГИ).

Научная новизна.

1) Впервые установлено существование «базовой» стратификации температуры и солености Черного моря и предложена оригинальная методология ее восстановления по данным альтиметрии и контактных измерений.

2) Показана адиабатичность смещений изохалинных и изотермических поверхностей в слое 100–1000 м глубоководной области Черного моря.

3) Впервые обоснована однопараметричность зависимости глубин залегания изохалин от уровня моря.

4) Впервые предложен алгоритм восстановления трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености для Черного моря, основанный на совместном анализе ограниченных контактных измерений и данных альтиметрии.

5) Получил дальнейшее развитие метод адаптивной статистики посредством оценки типичных дисперсий ошибок прогноза температуры и солености для модельного расчета на 20-летний интервал времени (с 1993 по 2012 гг.) без ассимиляции данных контактных измерений и подбора весового коэффициента у источника для коррекции значений дисперсий ошибок прогноза таким образом, чтобы величина горизонтальной адвекции и источника в уравнении переноса-диффузии тепла и соли были сопоставимы по порядку.

6) Обнаружен эффект распреснения вод Черного моря в 1993–2012 годах в верхнем 30-метровом слое и осолонение в более глубоких слоях на основе данных о профилях «базовой» солености и результатах реанализа.

Положения, выносимые на защиту:

1) методология комбинированного анализа альтиметрических и малочисленных гидрологических наблюдений в Черном море;

2) особенности изменчивости изотермических и изохалинных поверхностей на основе комплексного анализа альтиметрических и гидрологических данных;

3) оригинальный алгоритм восстановления ежесуточных трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености Черного моря по данным редких контактных измерений и альтиметрии;

4) усовершенствованная методология ассимиляции данных псевдоизмерений в модели на основе алгоритма адаптивной статистики;

5) характеристики сезонной, межгодовой, междекадной и синоптической изменчивостей полей Черного моря, полученные на основе анализа данных восстановленных полей псевдоизмерений и реанализа.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты реанализа сопоставлялись с данными наблюдений (профили температуры и солености по данным буев-профилемеров Argo (Roemmich et al., 2009), картами аномалий уровня моря AVISO (*http://www.aviso.oceanobs.com/*), данными реанализа гидрофизических полей Черного моря (Дорофеев, Сухих, 2017а; Дорофеев, Сухих, 2017б). Сопоставление показало хорошее качественное и количественное воспроизведение сравниваемых параметров.

Основные результаты диссертации представлялись на семинарах отдела динамики океанических процессов и «Оперативной океанографии» ФГБУН ФИЦ МГИ, на российских и международных конференциях.

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских проектов: тема НАН Украины «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию Черного и Азовских морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды» (шифр «Фундаментальная океанология»), ГР № 0111U001420 (2011–2015 гг.), исполнитель; тема НАН Украины «Климатические сценарии, мониторинг и риски» (шифр «Риски»), ГР № 0112U000709 (2012–2016 гг.), исполнитель; проект РФФИ «Ретроспективный анализ полей Черного моря как современный инструмент исследования изменчивости бассейна», № 14–45–01548 (2014 г.), исполнитель; тема «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий», № 0827–2014–0011 (2014–2017 гг.), исполнитель; проект РФФИ «Динамическая и термохалинная структура вихрей Черного моря по данным спутниковой альтиметрии, численного моделирования и измерений буев-профилемеров Арго», № 16–05–00264а (2016–2017 гг.), исполнитель; проект РФФИ «Ретроспективный анализ и исследование изменчивости гидрологических полей Черного моря», № 16–05–00621 (2016–2017 гг.), исполнитель; тема «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений», № 0827–2018–0002 (2018–2020 гг.), исполнитель; проект РНФ «Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна», № 17-77-30001 (2018–2020 гг.), исполнитель; КНП по приоритетным направлениям научно-технологического развития «Южный вектор национальной безопасности в условиях геополитических и климатических вызовов» (Соглашение №075–15–2024–528 от 24.04.2024 г.)**.**

Личный вклад автора. Постановка и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем, с которым обсуждались основные научные результаты и формулировки выводов. Лично автором были проведены усовершенствование метода адаптивной статистики ассимиляции данных наблюдений в модели циркуляции Черного моря; реализация алгоритма восстановления трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености по редким данным контактных измерений на гидрологических станциях, буями-профилемерами и данным альтиметрии для Черного моря; проведение численных расчетов и анализ полученных результатов.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 20 научных работ, из них 10 статей в рецензируемых научных журналах и 10 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях. Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 10 работ в рецензируемых научных изданиях [1–10]. В их числе 9 работ [2–10] в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы SCOPUS [3, 6, 9, 10] и Web of Science [2–10] и 1

работа [1] в издании, соответствующем 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».

Благодарности. Автор диссертации выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д-ру физ.-мат. наук Г.К. Коротаеву за помощь в выборе тематики исследования, последовательное руководство и ценные рекомендации на всех этапах выполнения работы. Соискатель выражает глубокую признательность д-ру физ.-мат. наук В.В. Кнышу, д-ру физ.-мат. наук С.Г. Демышеву, д-ру физ.-мат. наук А.А. Кубрякову, к.ф.-м.н. А.М. Мизюку и канд. физ.-мат. наук Д.В. Алексееву за поддержку, чуткое консультирование, конструктивные замечания и дискуссии, помощь в подготовке диссертации. Автор сердечно признателен им за ценные советы и помощь в преодолении возникавших трудностей.

Структура и объем работы. Работа состоит из Введения, трех Разделов, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений, Списка использованных источников. Объем работы составляет 163 страницы. Текст исследования иллюстрирован 69 Рисунками и 12 Таблицами. Библиографический список включает в себя 109 наименований, в том числе 49 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель исследования, поставленные задачи, новизну работы, ее практическую значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **первом разделе** предложена оригинальная методика совместного анализа нерегулярных по пространству и времени данных гидрологических измерений температуры и солености и спутниковых альтиметрических наблюдений. Она основана на построении эмпирических зависимостей между среднемесячными значениями температуры и солености в ограниченной 500-метровой изобатой области и различными градациями альтиметрического уровня Черного моря. Исследования выполнены в период 1993–2012 гг., когда количество судовых гидрологических наблюдений и зондирований буями Argo было весьма ограничено.

В подразделе 1.1 представлена методика анализа данных измерений температуры и солености с использованием альтиметрического уровня. Основу методики составляет разбиение уровня моря на градации с шагом 1 см и накопление внутри градаций соответствующих профилей температуры и солености для дальнейшего осреднения (Рисунок 1). Таким образом были получены эмпирические зависимости среднемесячных значений солености и температуры от глубины для различных значений уровня моря.

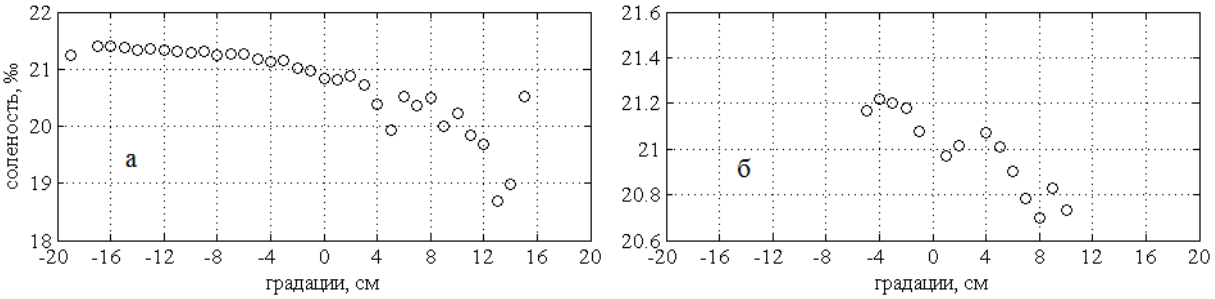


Рисунок 1 – Диаграммы значений среднемесячной солености для каждой градации уровня моря на горизонте 150 м: а – март 1993 г.; б – октябрь 1995 г.

Из множества полученных среднемесячных профилей температуры и солености, с учетом адиабатического приближения, в качестве основных выделены, скорректированы и проанализированы профили «нулевой» градации уровня «– 1, 0, 1 см», которые рассматриваются в качестве невозмущенных.

Диаграммы сезонной и межгодовой изменчивости среднемесячных профилей невозмущенной солености и температуры в слое 0–300 м (Рисунок 2) указывают на распреснение вод в верхнем слое 0–50 м к концу периода 1993–2002 гг. и уменьшение толщины ХПС моря.

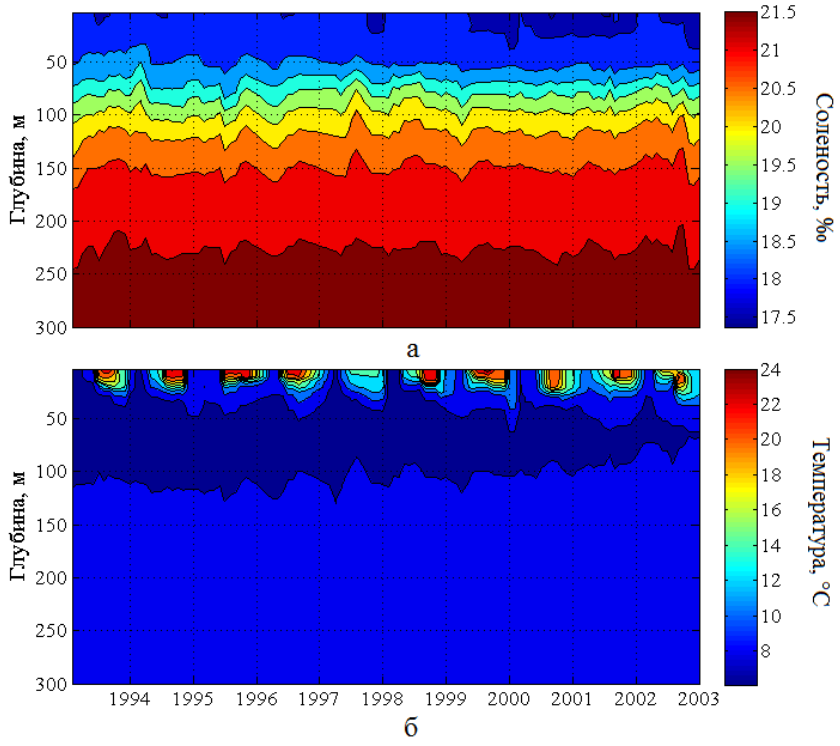


Рисунок 2 – Диаграммы сезонной и межгодовой изменчивости среднемесячных профилей солености (а) и температуры (б) «нулевой» градации уровня с учетом интерполяции в слое 0–300 м за период 1993–2002 гг.

Анализ T, S – кривых «нулевой» и не «нулевых» градаций уровня позволил установить, что профили измеренных температуры и солености на станциях, независимо от пространственного положения и времени выполнения станций, сближа-

ются в слое 50–1200 м и характеризуют промежуточную черноморскую водную массу, что указывает на преобладание адиабатических процессов на этих глубинах.

Вместе с тем, проведенный анализ показывает, что и в слое выше 100 метров существует определенная закономерность в расположении T, S – кривых в зависимости от градации уровня. Эта закономерность имеет сезонный ход и усложняется в ядре холодного промежуточного слоя.

Подраздел 1.2 посвящен описанию алгоритма восстановления трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености Черного моря и его валидации. Развитие методики анализа редких и нерегулярных по пространству и времени данных измерений температуры и солености позволило разработать и реализовать оригинальную процедуру формирования трехмерных полей солености и температуры для периода 1993–2012 гг.

Показано, что среднемесячные значения солености в слое 100–500 м в любой градации альтиметрического уровня моря можно выразить через среднемесячные значения солености «нулевой» градации (адиабатическое приближение), смещенные на некоторую иную глубину (Рисунок 3). Эти глубины рассчитаны на горизонтах модели (Рисунок 4), скорректированы и линейно аппроксимированы в зависимости от градаций уровня моря.

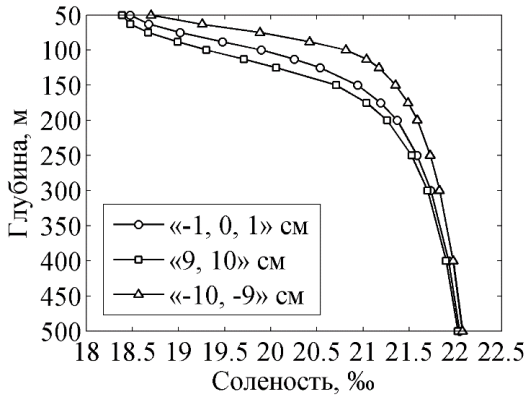


Рисунок 3 – Среднемесячные профили солености, соответствующие выбранным градациям уровня моря для мая 1994 года

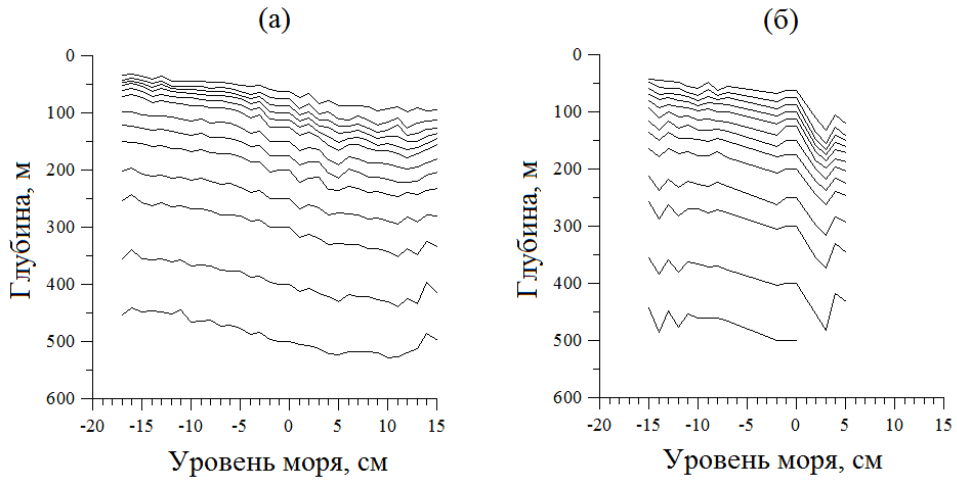


Рисунок 4 – Диаграммы зависимости глубин от градаций уровня моря на горизонтах слоя: а – апрель 1993 г., б – май 1998 г.

Ежесуточные профили солености на сетке альтиметрического уровня моря, ограниченной изобатой 500 м, определены посредством использования фактических значений уровня в линейных зависимостях глубин солености «нулевой» градации от других градаций на каждом горизонте слоя 100–500 м.

Восстановление ежесуточных профилей температуры в точках сетки альтиметрического уровня на горизонтах модели слоя 100–500 м проведено с использованием T, S – кривых «нулевой» градации (Рисунок 5).

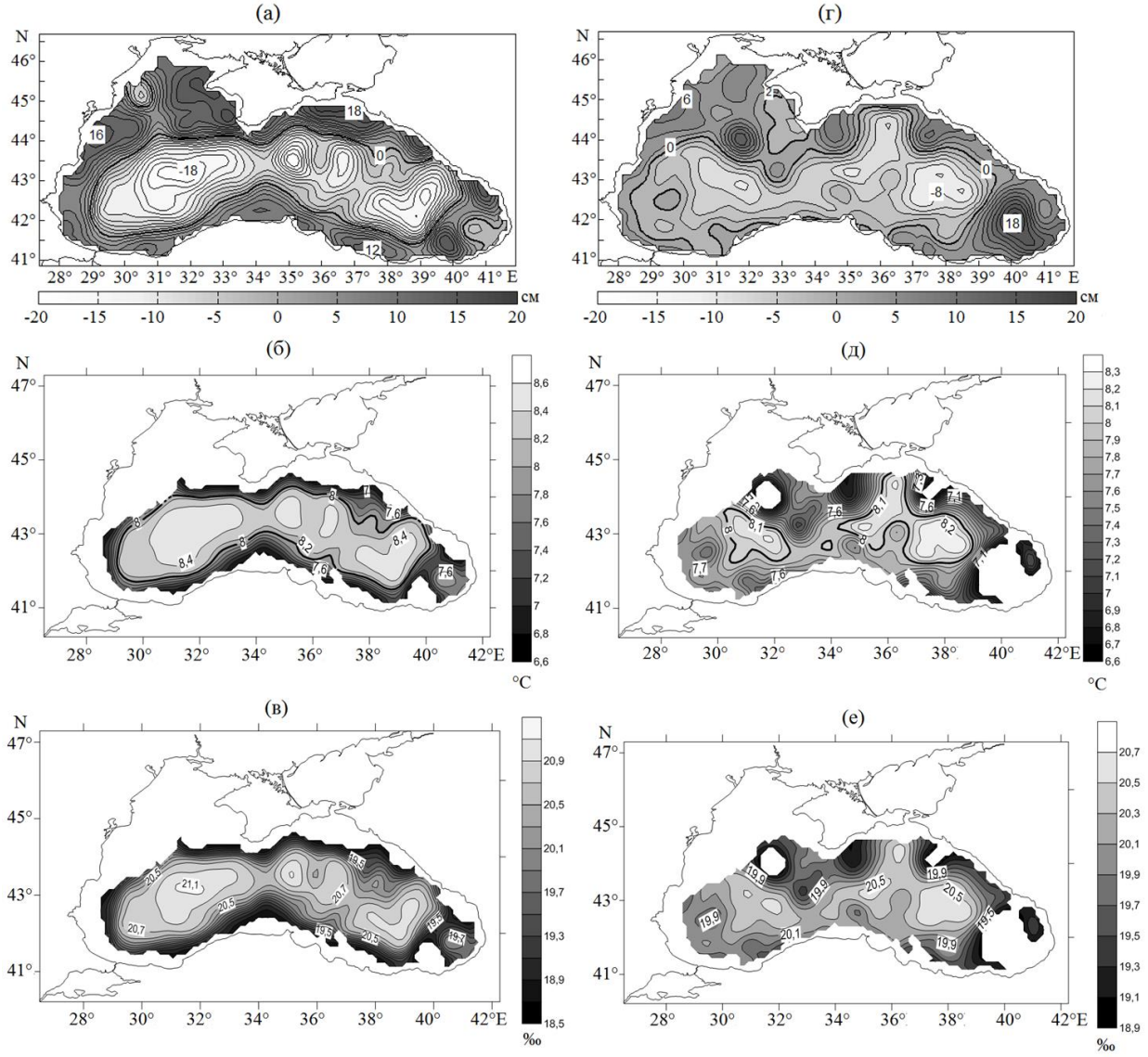


Рисунок 5 – Топография альтиметрического динамического уровня (а, г), восстановленные поля температуры (б, д) и солености (в, е) на горизонте 100 м, соответствующие 17 февраля (а, б, в) и 18 августа (г, д, е) 1993 г.

Оценка статистических характеристик точности восстановленных трехмерных полей температуры и солености (значения средних и среднеквадратических ошибок по всей площади и прямоугольным областям моря) на горизонтах слоя 100–500 м, выполненная посредством сопоставления с данными измерений на станциях, свидетельствует об удовлетворительном качестве воспроизведения термохалинных параметров.

Второй раздел посвящен анализу межгодовой изменчивости гидрофизических полей Черного моря, полученных на основе результатов численного моделирования, проведенного за период 1980–1993 гг. с использованием вихреразрешающей модели Морского гидрофизического института (МГИ), полей атмосферного реанализа *ERA Interim* и ассимиляции среднегодовых и среднемесячных профилей невозмущенной температуры и солености. Также исследована синоптическая изменчивость гидрофизических полей Черного моря.

В подразделе 2.1 приведено краткое описание модели МГИ и граничных условий, используемых при проведении численного расчета.

Подраздел 2.2 описывает методику формирования ассимилируемых в модели профилей температуры и солености. Методика формирования среднегодовых профилей состоит в построении диаграмм эмпирических зависимостей между значениями среднегодового уровня Черного моря (в выбранных градациях) и соответствующими значениями среднегодовой солености (температуры). Среднегодовые значения уровня, температуры и солености рассчитывались посредством осреднения среднесуточных значений соответствующих параметров, полученных в реанализе крупномасштабных полей моря за период 1971–1993 гг. Среднегодовые профили невозмущенной солености (температуры) брались из «нулевой» градации (–1, 0, +1) среднегодового уровня моря.

Коррекция модельных значений температуры и солености полученными среднегодовыми профилями проводилась по формуле

$$T^{+}(x,y,z,t) = T^{-}(x,y,z,t) + \frac{1}{320} \times \frac{1}{n(z)} \times (T^{\text{ср}}(z,t_z) - \bar{T}(z,t)), \qquad (1)$$

где $\bar{T}(z,t)$ – среднее по горизонту значение модельной температуры; $T^{\text{ср}}(z,t_z)$ – среднегодовое значение невозмущенной температуры; $n(z)$ – количество точек на горизонте. Верхние индексы «–», «+» означают значения температуры до и после коррекции.

Среднегодовые профили невозмущенной температуры отслеживают холодозапас ХПС в соответствии со шкалой зимних термических условий в атмосфере. Аналогичные профили солености отражают характерную изменчивость ее в постоянном халоклине.

При выполнении реанализа по вихреразрешающей модели необходим учет сезонной изменчивости ассимилируемых в модели профилей невозмущенной температуры и солености. Этот вывод подтверждает анализ тенденций сезонной и межгодовой изменчивости средней в слое 0–300 м температуры, солености и кинетической энергии, а также диаграмм межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры и солености.

Анализ воспроизводимости вихреразрешающей моделью наблюдаемых синоптических вихрей показал, что синоптическая изменчивость гидрофизических полей Черного моря в реанализе за период 1980–1993 гг. несколько выше, чем в прогностическом расчете. Основное Черноморское течение (ОЧТ), восточный и западный циклонические круговороты и синоптическая изменчивость справа от ОЧТ ярко выражены в холодном 1993 году как в прогностическом расчете, так и по реанализу за период 1980–1993 гг. Однако, количество вихрей больше и интенсивность анти-

циклонической циркуляции выше в реанализе с коррекцией модельных значений температуры и солености среднегодовыми значениями. По данным обоих численных экспериментов имеются все же расхождения по фазе.

Сопоставление расчетного и альтиметрического уровней моря позволяет заключить, что интенсивность поверхностных геострофических течений градиентной природы в антициклонах альтиметрического уровня выше, чем интенсивность аналогичных течений в антициклонах уровня, восстановленного по модели.

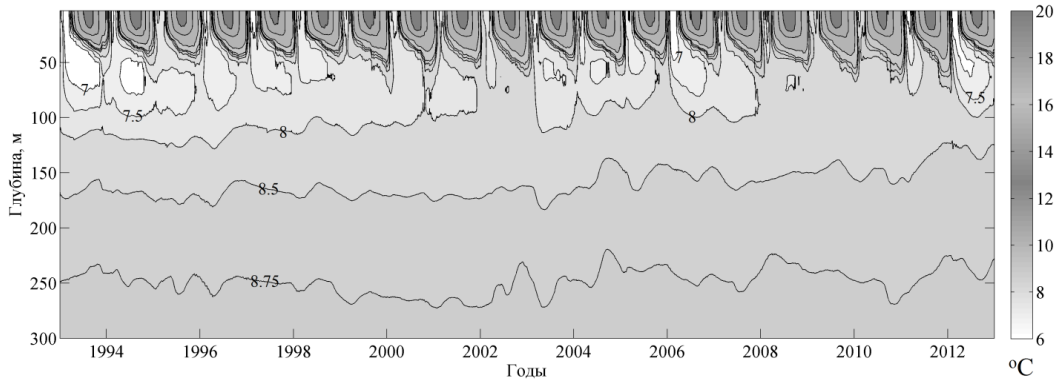
Интенсивность ОЧТ, а также циркуляции в антициклонах справа от него оказалась заметно выше в расчете с увеличенными в 1,5 раза компонентами вектора тангенциального напряжения трения ветра. Синоптическая изменчивость гидрофизических полей ярко выражена тогда, когда интенсифицируется ОЧТ. К лету ОЧТ имеет тенденцию к разрушению. В период с 24.08.1993 г. по 17.11.1993 г. ОЧТ разрушено как в поле уровня моря, восстановленном по модели, так и по альтиметрическим данным. В этот период поверхностная геострофическая циркуляция вод моря в обоих вариантах различается между собою в наибольшей степени.

В подразделе 2.3 выполнен ретроспективный анализ гидрофизических полей Черного моря за 1993–2012 гг. с ассимиляцией в модели среднемесячных профилей температуры и солености «нулевой» градации альтиметрического уровня моря. Этот эксперимент является продолжением реанализов полей моря, выполненных ранее за предыдущие 1971–1993 годы.

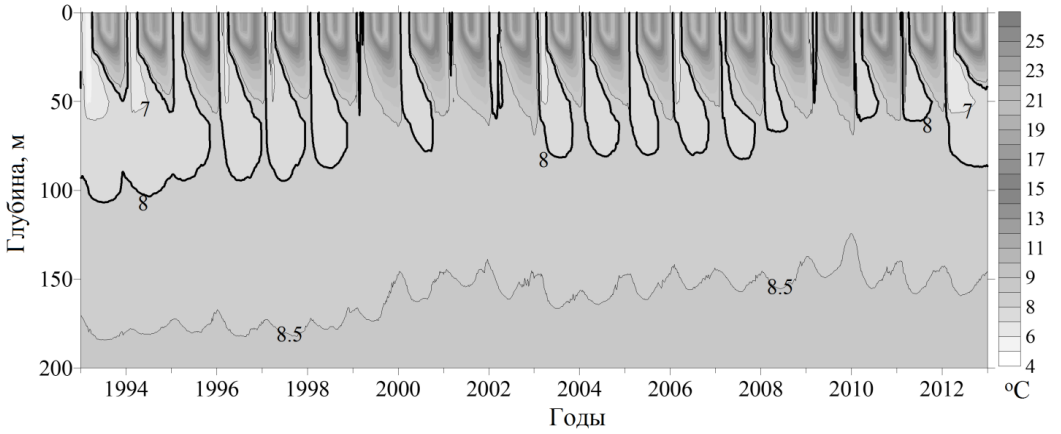
Использование среднемесячных профилей температуры и солености позволяет уменьшить средние отклонения воспроизведенных полей температуры и солености от наблюдений в пределах основного пикноклина и таким образом более точно воспроизвести межгодичные изменения температурной и халинной стратификации.

Анализ тенденции межгодовой и сезонной изменчивости средней в слое сезонного галоклина 2,5–30 м солености позволил выявить отрицательный линейный тренд, аргументированное подтверждение которого содержится в данных работ (Полонский и др., 2013; Ильин и др., 2012; Репетин и др., 2006; Белокопытов, 2013). Тенденции межгодовой изменчивости температуры средней в слоях 2,5–30, 30–100, 100–300, 300–800 и 800–2000 м моря являются положительными и объясняются зимними термическими условиями, характеризующимися наиболее холодными (1992, 1993 гг.), нормальными (2003–2007 гг.) и теплыми (1999, 2001, 2002, 2008–2011 гг.) зимами (Рисунок 6).

Выявлена четкая корреляция между межгодовой и сезонной изменчивостью вихря касательного напряжения трения ветра и средней на горизонтах кинетической энергии. Отрицательные тенденции межгодовой изменчивости кинетической энергии, осредненной по слоям 2,5–30, 30–100 и 100–300 м, обусловлены уменьшением осредненного по поверхности моря модуля вектора касательного напряжения трения ветра.



(а)



(б)

Рисунок 6 – Диаграммы межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры: (а) – в слое 0–300 м за 1993–2012 годы; (б) – в слое 0–200 м за 1992–2012 годы (1992 год не приведен)

Третий раздел посвящен выполнению ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией в модели трехмерных полей псевдоизмерений. Для ассимиляции трехмерных полей использовался метод адаптивной статистики.

В подразделе 3.1 приводятся основные соотношения для процедуры ассимиляции данных наблюдений температуры и солености. Расчет дисперсий ошибок оценок температуры и солености выполняли посредством численного решения соответствующих дифференциальных уравнений, вывод которых основан на уравнениях переноса–диффузии тепла и соли. Методика получения дифференциальных уравнений дисперсий ошибок оценок температуры и солености для σ-координатной модели более полно изложена в работе (Мизюк, 2009). Дифференциальное уравнение дисперсии ошибок оценок температуры для z-координатной модели имеет следующий вид (аргументы функций опущены)

$$\frac{\partial \sigma_T^2}{\partial t}+\frac{\partial \sigma_T^2 u}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_T^2 v}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_T^2 w}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\kappa^T\frac{\partial \sigma_T^2}{\partial z}+\kappa^H\Delta\sigma_T^2+\frac{1}{REL}(\sigma_{*T}^2-\sigma_T^2). \qquad (2)$$

В правой части уравнения (2) κ^T,κ^H – вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентного обмена, Δ – оператор Лапласа, третье слагаемое – источ-

ник, учитывающий сезонную изменчивость типичных дисперсий ошибок прогноза температуры $\sigma^2_{*T}(\vec{x},t_l)$ (солености $\sigma^2_{*S}(\vec{x},t_l)$) Черного моря; параметр релаксации *REL* равен 10 сут.

Коррекции температуры в модели описана следующей формулой

$$\widehat{T}(\vec{x},t_l^{**}) = \widehat{T}(\vec{x},t_l^{*}) + \frac{\sigma_T^2(\vec{x},t_l^{*})}{\left[\ \sigma_T^2(\vec{x},t_l^{*}) + \sigma_{ошT}^2(\vec{x},t_l)\ \right]}\left[T^{obs}(\vec{x},t_l^{*}) - \widehat{T}(\vec{x},t_l^{*})\right], \qquad (3)$$

где $T^{obs}(\vec{x},t_l^{*})$ – восстановленные трехмерные поля псевдоизмерений температуры на момент времени t_l; знаками «*», «**» отмечены значения функций до и после коррекции соответственно; $\sigma^2_{ошT}(\vec{x},t_l)$ – дисперсии ошибок восстановления.

Температура при коррекции по формуле (3) меняется скачком. Для достижения плавного изменения гидрофизических полей моря при численном решении уравнений модели в правые части уравнений переноса-диффузии тепла включали источник следующего вида

$$Q_T(\vec{x},t_l) = \frac{\sigma_T^2(\vec{x},t_l^{*})}{REL1\left[\ \sigma_T^2(\vec{x},t_l^{*}) + \sigma_{ошT}^2(\vec{x},t_l^{*})\ \right]}\left[T^{obs}(\vec{x},t_l) - T(\vec{x},t_l)\right]. \qquad (4)$$

Оценка типичных дисперсий ошибок прогноза температуры $\sigma^2_{*T}(\vec{x},t_l)$ и солености $\sigma^2_{*S}(\vec{x},t_l)$ выполнена по приведенной в (Мизюк, 2014) методике. Параметр релаксации *REL*1 равен 12 ч. В отличие от указанной выше статьи, для оценки типичных дисперсий использовался ансамбль значений температуры и солености, полученный в результате расчета по модели МГИ (Лишаев и др., 2014) на 20 лет (с 1993 по 2012 гг.) без ассимиляции данных измерений. Атмосферные поля задавались по результатам реанализа *ERA-Interim* (Berrisford et al., 2009). Такой подход методически близок к получению ансамбля векторов состояния модели для оценки матрицы ковариаций в разработанном параллельном алгоритме ансамблевой оптимальной интерполяции, изложенном в работе (Кауркин, 2016).

Пусть T^m_{i,j,k,t_d} – временной ряд трехмерных полей прогностической температуры, восстановленной по результатам прогноза с дискретностью по времени 1 сут на период *m* лет [1, 20] с горизонтальным разрешением 5×5 км в точках сетки модели: *i* [1, 238] по оси *x*, *j* [1, 132] по оси *y*, *k* [1, 38] по оси *z*. Тогда в качестве типичной дисперсии ошибок прогноза температуры на каждые сутки в пределах условного года *d* [1, 365] принимали квадрат отклонений температуры от среднего по времени, просуммированный по годам

$$\sigma^2_{*T\,i,j,k,t_d} = \frac{1}{19}\sum_{m=1}^{20}\left[T^m_{i,j,k,t_d} - \overline{T}_{i,j,k,t_d}\right]^2, \qquad (5)$$

где среднее значение температуры рассчитывали по формуле

$$\overline{T}_{i,j,k,t_d} = \frac{1}{20}\sum_{m=1}^{20} T^m_{i,j,k,t_d}\ . \qquad (6)$$

Оценка типичной дисперсии ошибок прогноза солености выполнялась аналогично. Дисперсии ошибок восстановления псевдоизмерений $\sigma^2_{ошT}(\vec{x},t_l)$, $\sigma^2_{ошS}(\vec{x},t_l)$ на

горизонтах слоя 100–500 м равнялись осредненному за месяц квадрату СКО восстановленных температуры и солености относительно измерений буями *Argo*.

В подразделе 3.2 выполнен ретроспективный анализ гидрофизических полей моря за период 1993–2012 гг. с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в слое 63–500 м методом адаптивной статистики. Оценка качества выполненного реанализа проводилась путем расчета среднеквадратических отклонений между восстановленными полями температуры и солености и контактными измерениями за весь период времени расчета (Таблица 1, Таблица 2).

Таблица 1 –Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) отклонения восстановленных по модели полей температуры: I – по методу адаптивной статистики; II – с ассимиляцией профилей невозмущенных температуры и солености

Слой, м	СКО, (°C)^2		СО, °C
	I	II	I
0–5	1,559	1,963	–0,830
5–30	3,331	3,155	1,220
30–100	0,953	1,239	0,320
100–300	0,130	0,248	–0,003
300–500	0,036	0,037	0,0001
500–2000	0,012	0,019	0,109

Таблица 2 – Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) отклонения восстановленных по модели полей солености: I – по методу адаптивной статистики; II – с ассимиляцией профилей невозмущенных температуры и солености

Слой, м	СКО, (‰)^2		СО, ‰
	I	II	I
0–5	0,625	0,624	0,034
5–30	0,487	0,485	–0,098
30–100	0,413	0,500	–0,134
100–300	0,176	0,343	–0,007
300–500	0,043	0,051	–0,010
500–2000	0,025	0,019	0,004

Сравнительное сопоставление СКО, восстановленной в двух реанализах солености (Таблица 2) показывает, что в слоях 0–5 и 5–30 м эти статистические характеристики почти одинаковы. Рассчитанная оценка СКО солености в главном галоклине (слои 30–100 и 100–300 м) и глубже (слой 300–500 м) по данным реанализа с усвоением псевдоизмерений солености в модели методом адаптивной статистики существенно ниже. Этот результат объясняется хорошим качеством восстановленных в пикноклине трехмерных полей псевдоизмерений солености.

Поля альтиметрического уровня моря, рассчитанные на каждые сутки за 1993–2014 гг., позволили оценить СКО модельного уровня моря по данным двух реанализов. Представляет интерес их сопоставление с СКО уровня моря, полученными по данным чисто прогностического расчета (Рисунок 7). Последний был проведен на 20

лет с 1993 по 2012 гг. с использованием реанализа *ERA-Interim*. СКО уровня в прогностическом расчете заметно выше. Значения СКО уровня моря (относительно альтиметрического) по данным нашего реанализа в первой декаде рассматриваемого периода меньше, чем по данным реанализа из работ (Дорофеев, Сухих, 2017а; Дорофеев, Сухих, 2017б).

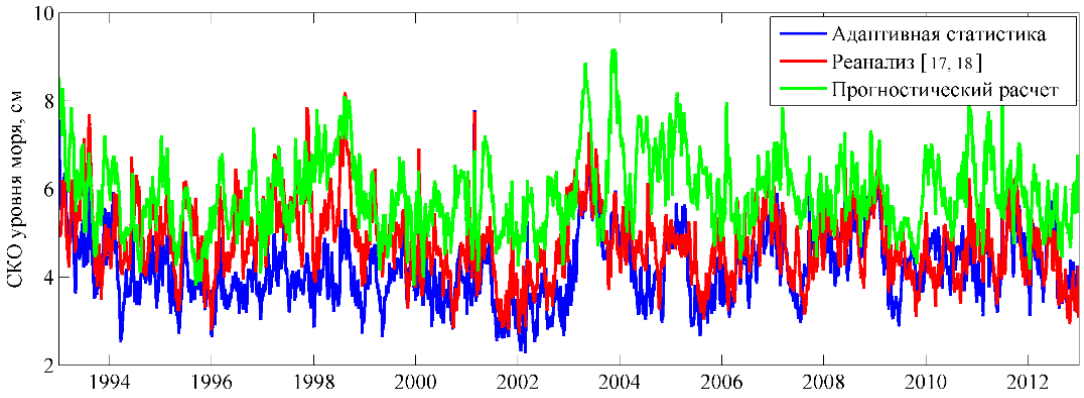


Рисунок 7 – Сезонная и межгодовая изменчивость СКО восстановленного уровня моря (относительно альтиметрического)

Это объясняется тем, что в первой декаде периода 1993–2014 гг. обеспеченность измерениями температуры и солености на гидрологических станциях в глубоководной области моря была существенно выше (Korotaev et al., 2016b), чем во второй декаде. В соответствии с этим точность воспроизведения псевдоизмерений температуры и солености в этой области моря также оказалась более высокой. Вторая декада характеризуется ограниченными данными измерений термохалинных параметров на отдельных гидрологических станциях и буями-профилемерами *Argo*.

Подраздел 3.3 посвящен уточнению алгоритма восстановления псевдоизмерений температуры и солености Черного моря для верхнего 100-метрового слоя. Для восстановления профилей солености в слое 2,5–125 м использовались методологические принципы оптимальной интерполяции (Гандин, Каган, 1976). Автокорреляционную функцию поля солености (температуры) с учетом ее нормирования представим в следующем виде (Коротаев и др., 2018)

$$P_S(\vec{x},\vec{x}',t)=\sigma_S(\vec{x},t)\sigma_S(\vec{x}',t)P_S^{н}(\vec{x},\vec{x}',t), \qquad (7)$$

где $\sigma_S(\vec{x},t), \sigma_S(\vec{x}',t)$ – среднеквадратические отклонения (СКО) солености (температуры); $\vec{x}=(x,y,z)$; ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вниз; $P_S^{н}(\vec{x},\vec{x}',t)$ – нормированная автокорреляционная функция поля солености (температуры).

В качестве основного базового принимается горизонт z_* = 150 м, для которого имеются псевдоизмерения на всей площади моря. В этом случае формула для восстановления в глубоководной области моря псевдоизмерений солености на горизонтах z_k в узлах i ,j имеет вид

$$S_{i,j}^{восст}(z_k,t_l)=S_{i,j}^{прогн}(z_k,t_l)+\frac{\sigma_S(z_*,t_l)\sigma_S(z_k,t_l)P_S^{н}(z_*,z_k,t_l)}{\sigma_S^2(z_*,t_l)+\sigma_{ошS}^2(z_*)}\left[S_{i,j}^{псевдо}(z_*,t_l)-S_{i,j}^{прогн}(z_k,t_l)\right], \qquad (8)$$

где k обозначают номера горизонтов (от 1 до 15) по оси z на глубинах 2,5–125 м включительно; время измеряется в сутках; $\sigma_S^2(z_*,t_l)$ – дисперсия псевдоизмерений солености на базовом горизонте; $\sigma_{ошS}^2(z_*)$ – дисперсия ошибок «измерений» на горизонте z_*.

Числитель дроби представляет собой ненормированную функцию ковариации солености $P_S(z_*,z_k,t_l)$.

Оценка функции ковариации псевдоизмерений солености на горизонте z_* с модельной соленостью на вышележащих горизонтах z_k выполнялась следующим образом

$$P_S(z_*,z_k,t_l)=\frac{1}{N-1}\sum_{i,j}\delta S_{i,j}(z_*,t_l)\delta S_{i,j}(z_k,t_l), \qquad (9)$$

где N – количество узлов сетки на горизонтах слоя 2,5–150 м в глубоководной области моря,

$$\delta S_{i,j}(z_*,t_l)=S_{i,j}^{псевдо}(z_*,t_l)-\overline{S}^{псевдо}(z_*,t_l), \qquad (10)$$

$$\delta S_{i,j}(z_k,t_l)=S_{i,j}^{прогн}(z_k,t_l)-\overline{S}^{прогн}(z_k,t_l), \qquad (11)$$

черта означает осреднение по горизонту.

Восстановление полей псевдоизмерений термохалинных параметров в глубоководной области моря проводили итерационным способом.

Особенности восстановленных полей солености на горизонтах слоя 2,5–63 м демонстрирует Рисунок 8. Видно монотонное уменьшение солености к границам области, прослеживающееся на всех приведенных горизонтах.

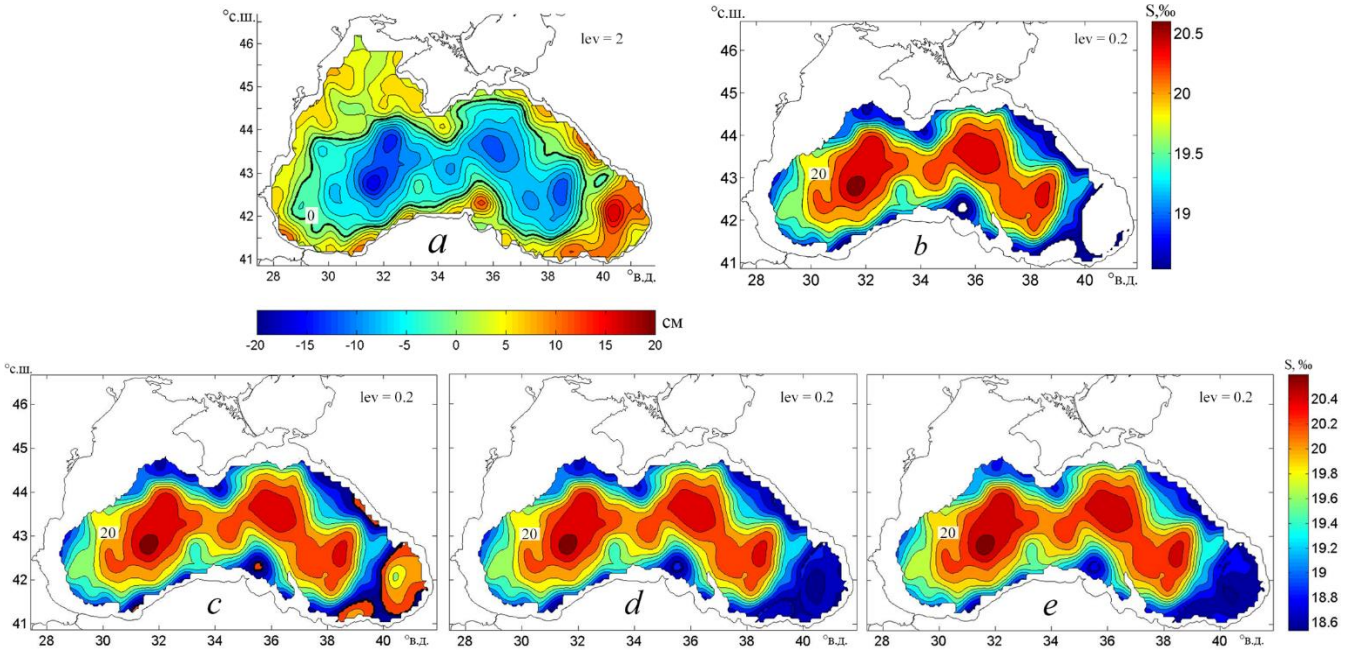


Рисунок 8 – Топография альтиметрического уровня моря (*a*) и соленость на горизонте 88 м: с «пустыми» областями (*b*) и восстановленная в первой (*c*), третьей (*d*), пятой (*e*) итерациях 14.08.2012 г.

Конфигурация восточного и западного циклонических круговоротов так же, как и расположение циклонических вихрей на этих горизонтах, хорошо согласуется с топографией альтиметрического уровня моря. Такие же результаты получены при коррекции и воспроизведении полей псевдоизмерений солености для зимнего, весеннего и осеннего сезонов.

Анализ средних по сезонам профилей восстановленной температуры выявил более заметное расхождение между ними и построенными по измерениям профилями, особенно в приповерхностном слое 2,5–40 м. Сезонные профили температуры можно считать удовлетворительными только в слое 50–125 м. Формальной причиной этого является отрицательная ковариация флуктуаций температуры на базовом горизонте (63 м) с ее значениями в приповерхностном слое, что приводит к неустойчивости величин интерполяционных коэффициентов. Фактически плохое качество работы алгоритма восстановления температуры морской воды указывает на преобладание вклада потоков тепла на поверхности моря в формирование флуктуаций температуры по сравнению с влиянием динамики глубинных слоев моря по крайней мере до глубины 50 м.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена восстановлению и анализу гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа, выполненного посредством ассимиляции в модели циркуляции трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености, полученных по предложенному оригинальному алгоритму, основанному на совместном анализе малочисленных контактных измерений и данных альтиметрии.

Основные научные результаты могут быть сформулированы следующим образом:

1) доказано наличие «базовой» стратификации температуры и солености Черного моря и предложена оригинальная методология ее восстановления по данным альтиметрии и контактных измерений;

2) показана адиабатичность смещений изохалинных и изотермических поверхностей в слое 100 – 1000 м глубоководной области Черного моря;

3) обоснована однопараметричность зависимости глубин залегания изохалин от уровня моря;

4) предложен оригинальный алгоритм восстановления трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености для глубоководной области Черного моря, основанный на совместном анализе редких контактных данных наблюдений и данных альтиметрии;

5) на основе данных о профилях «базовой» солености и результатах реанализа выявлено распреснение вод Черного моря в верхнем 30-метрововм слое и осолонение в более глубоких слоях, согласующиеся с данными наблюдений;

6) выполнены новые оценки типичных дисперсий ошибок прогноза температуры и солености и адаптации модельных дисперсий ошибок к циркуляции вод бас-

сейна, использование которых позволило уточнить метод адаптивной статистики. Применение метода адаптивной статистики обеспечило согласованность между гидрофизическими полями и полями дисперсии ошибок прогноза. Пространственное распределение модельной дисперсии ошибок прогноза характеризуется локализацией повышенных значений в циклонических круговоротах и циклонах, а пониженных – в антициклонах. Модули разностей (невязок) между псевдоизмерениями и модельными значениями температуры и солености меньше в структурах с положительной завихренностью и больше в структурах с отрицательной завихренностью. Метод адаптивной статистики позволил воспроизвести на более качественном уровне (по сравнению с упрощенным методом ассимиляции) мезомасштабные вихревые структуры в полях течений и уровня моря. Положения синоптических вихрей на картах уровня моря, восстановленного в реанализе и полученного по данным альтиметрии, сходны;

7) показано, что посредством ассимиляции псевдоизмерений температуры и солености в модели методом адаптивной статистики удается воспроизвести реалистичную изменчивость термохалинных характеристик в главном пикноклине. Выявлено, что значения СКО уровня моря по данным выполненного реанализа в первой декаде рассматриваемого периода являются меньшими по сравнению с реанализами за аналогичный период других авторов. Экстремальные значения СКО уровня моря в реанализе за 1993–2014 гг. несколько выше во второй декаде периода, что обусловлено более низкой обеспеченностью измерений температуры и солености на буях Argo. Исследование пространственной структуры интегральной дисперсии поля уровня моря, рассчитанной по данным реанализа за 1993–2014 гг., позволяет судить о характере синоптической изменчивости полей течений, температуры и солености в Черном море.

ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. **Лишаев П.Н.**, Коротаев Г.К., Кныш В.В., Мизюк А.И., Дымова О.А. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980 – 1993 годы // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – №5. – С. 49–68.

2. Коротаев Г.К., **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В. Методика анализа данных измерений температуры и солености Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – №2. – С. 26–42. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-2-26-42.
(Korotaev G.K., **Lishaev P.N.**, Knysh V.V. Technique of the Black Sea Temperature and Salinity Measurement Data Analysis Using Dynamic Altimetry Level // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2015. – 2. – P. 24–38. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-2-24-38).

3. Коротаев Г.К., **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В. Восстановление трехмерных полей солености и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических наблюдений // Исследование Земли из космоса. – 2016. – №1–2. – С. 199–212. DOI: 10.7868/S0205961416010073.

(Korotaev G.K., **Lishaev P.N.**, Knysh V.V. Reconstruction of the Three-Dimensional Salinity and Temperature Fields of the Black Sea on the Basis of Satellite Altimetry Measurements // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol.52, №9. – P.961-973. DOI: 10.1134/S0001433816090152).

4. Кныш В.В., Коротаев Г.К., **Лишаев П.Н.** Методика использования трехмерных полей температуры и солености Черного моря, восстановленных по малочисленным данным измерений и альтиметрии, в оперативной прогностической модели // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №2. – С. 53–69. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-2-53-69.

(Knysh V.V., Korotaev G.K., **Lishaev P.N.** Methodology of Application of the Black Sea Three-Dimensional Temperature and Salinity Fields Reconstructed on the Basis of Altimentry and Scanty Measurements in the Operational Prognostic Model // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2016. – 2. – P. 46–61. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-2-46-61).

5. Кныш В.В., **Лишаев П.Н**. Уточнение методики восстановления трехмерных полей солености и температуры Черного моря по редким измерениям и альтиметрии // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №6. – С. 5–17. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-6-5-17.

(Knysh V.V., **Lishaev P.N.** Improvement of the Method for Reconstructing the Temperature and Salinity Three-Dimensional Fields of the Black Sea Based on Insufficient Measurements and Altimetry // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2016. – 6. – P. 3–14. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-3-14).

6. Коротаев Г.К., Саркисян А.С., Кныш В.В., **Лишаев П.Н.** Реанализ сезонной и межгодовой изменчивости полей Черного моря за 1993 – 2012 гг. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т.52, №4. – С. 475-487. DOI: 10.7868/S0002351516040076.

(Korotaev G.K., Knysh V.V., **Lishaev P.N.**, Sarkisyan A.S. Reanalysis of Seasonal and Interannual Variability of Black Sea Fields for 1993 – 2012 // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol.52, №4. – P. 418-430. DOI: 10.1134/S0001433816040071).

7. Коротаев Г.К., Кныш В.В., **Лишаев П.Н.**, Демышев С.Г. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т.34, №1. – С. 40–56. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-1-40-56.

(Korotaev G.K., Knysh V.V., **Lishaev P.N.**, Demyshev S.G. Application of the Adaptive Statistics Method for Reanalysis of the Black Sea Fields Including Assimilation of the Temperature and Salinity Pseudo-measurements in the Model // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2018. – 25(1). – P. 36–51. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-1-36-51).

8. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Воспроизведение изменчивости уровня и характеристик пикноклина Черного моря на основе метода адаптивной статистики // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т.34, №4. – С. 271–282. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-271–282.

(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K. Reproduction of Variability of the Black Sea Level and Pycnocline Characteristics Based on the Adaptive Statistics Method // Physical

Oceanography, [e-journal]. – 2018. – 25(4). – P. 251–261. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-4-251-261).

9. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Восстановление температуры и солености в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т.35, №2. – С. 114–133. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-114-133.
(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K. Reconstruction of Temperature and Salinity in the Upper Layer of the Black Sea Using Pseudo-Measurements on the Underlying Horizons // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2019. – 26(2). – P. 104–122. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-104-122).

10. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Восстановление гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией поверхностной температуры и псевдоизмерений температуры, солености в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т.36, №5. – С. 485–500. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-485-500.
(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K., Reconstructing the Black Sea Hydrophysical Fields Including Assimilation of the Sea Surface Temperature, and the Temperature and Salinity Pseudo-Measurements in the Model // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2020. – 27(5) – P. 445-459. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-445-459).

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Лишаева Павла Николаевича

Подписано к печати 02.12.2024 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л. Заказ № 150 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055, г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143
Тел.: +7(8692) 65-60-11
cdpi@rambler.ru