

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи



Булгаков Сергей Николаевич

**ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И
СТРАТИФИКАЦИИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ.
РОЛЬ ПОТОКОВ ПЛАВУЧЕСТИ.**

01.04.12 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь – 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754375 (V)

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

Булгаков Сергей Николаевич

**ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И
СТРАТИФИКАЦИИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ.
РОЛЬ ПОТОКОВ ПЛАВУЧЕСТИ.**

01.04.12 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь – 1996

ДВ 34.365

Диссертация является рукописью.
Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте (МГИ)
Национальной Академии наук Украины.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Богуславский Сергей
Григорьевич (Экспериментальное отделение МГИ НАН Украины),

доктор физико-математических наук Мадерич Владимир
Станиславович (Институт гидромеханики НАН Украины),

доктор географических наук Овчинников Иван Михайлович
(Южное отделение ИО РАН).

Ведущая организация: Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук.

Защита состоится 7 мая 1996 г. в 9³⁰ часов
на заседании специализированного совета Д 11.01.02 при Морском
гидрофизическом институте НАН Украины.

Адрес института: 335000, г. Севастополь, ул. Капитанская 2.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГИ НАНУ

Автореферат разослан 12 марта 1996 г.

Ученый секретарь специализированного совета
доктор физ.-мат. наук А.М. Суворов

ЛИБ. им. В. Стефанюка
АН Украины

Актуальность темы диссертации.

Черное море имеет во многом уникальную по своим физическим, химическим, оптическим и биологическим характеристикам структуру вод вследствие обособленности от Мирового океана. Это объясняет его притягательность как объекта научных исследований. Вместе с тем оно — типичный пример внутреннего моря, имеющего протяженную береговую границу и ограниченный водообмен с другими регионами Мирового океана через проливы. Примерами других внутренних морей могут служить Средиземное, Мраморное, Азовское, Балтийское, Красное и пр.

Из наблюдений известно (Блатов и др., 1984); что Черное море характеризуется различными масштабами изменчивости основных гидрофизических полей. Здесь наблюдаются мелко- и мезомасштабные неоднородности, синоптические процессы, сезонные колебания, а также крупномасштабные течения и вертикальная стратификация вод. Под крупномасштабной циркуляцией и стратификацией понимается кинематический и гидрологический фон Черного моря, на котором развиваются гидрофизические процессы меньших пространственно-временных масштабов.

Вопрос природы формирования крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря до сих пор считается нерешенным (Булгаков, Коротаев, 1987; Stanev, 1990; Рябцев, Шапиро, 1994; Oguz et al., 1994). Существуют различные взгляды на механизмы их формирования. В качестве основных движущих сил рассматриваются ветер, а также потоки плавучести $\partial\beta_s/\partial n$, обусловленные потоками тепла и соли на границах бассейна. Здесь n — вектор нормали к границе моря, а плавучесть $\beta_s = g(\rho_0 - \rho)/\rho_0$ характеризует вертикальный перепад плотностей, где $\rho = \rho(x, y, z)$ — плотность морской воды, $\rho_0 = \text{const}$ — ее максимальная плотность.

Общей особенностью большинства внутренних морей северного полушария является существование единой циклонической системы течений и стратифицированность вод. Поэтому вопрос изучения природы или механизмов формирования крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря, как и других внутренних морей, имеет общефизическое значение. По мнению Шулейкина

(1968), " ... вопрос об основных движущих силах в морях и океанах является основным вопросом физики моря...".

Настоящее исследование основано на халинной гипотезе (Булгаков, Коротаев, 1984), предполагающей, что потоки плавучести, связанные с потоками соли через открытые боковые границы бассейна (устья рек, проливы), являются возможным механизмом генерации крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

Поскольку Черное море — объект активной хозяйственной деятельности, то сравнительно небольшие размеры и ограниченность его связей с Мировым океаном делают этот бассейн чрезвычайно уязвимым к все возрастающим антропогенным нагрузкам. Достаточно сказать, что создание ряда водохранилищ в системе рек причерноморского бассейна почти полностью нарушило естественный сезонный цикл материкового стока (Вендров, 1979). Такое зарегулирование стока рек, по-видимому, может найти свое отражение в изменениях гидрологической структуры и динамического режима Черного моря в среднем многолетнем плане. В свою очередь, в результате изменения вертикального водообмена могут последовать различные негативные явления в виде изменения положения верхней границы сероводородной зоны, уменьшения биологических запасов моря и общего ухудшения качества морской воды.

В этой связи вопрос о роли потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря представляется актуальной проблемой исследования.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является изучение особенностей кинематической и гидрологической структур вод, формируемых потоками плавучести через открытые боковые границы бассейна (устья рек, проливы), и исследование роли данного воздействия в генерации крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое исследование особенностей гидрологической структуры вод и течений, формируемых потоками плавучести.
2. Проверка результатов теоретического анализа данными лабораторных экспериментов во вращающемся бассейне.
3. Сопоставление результатов теоретического и лабораторного моделирования с данными инструментальных измерений в Черном море.

Положения, выносимые на защиту:

1. Потоки плавучести — важный климатообразующий фактор генерации крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

2. Поступление пресных речных вод в поверхностном слое моря и соленых мраморноморских вод на нижележащих горизонтах приводит к формированию основных элементов крупномасштабной циркуляции и вертикальной стратификации вод Черного моря.

3. Отличительная особенность гидрологических и кинематических полей, обусловленных потоками плавучести, — расширение главного пикноклина и трехслойная система горизонтальных движений с противотечением в слое скачка плотности.

4. Архивные и вновь полученные данные инструментальных измерений скорости течений и плотности морской воды показывают возможность существования аналогичных элементов кинематической и гидрологической структур вод в Черном море.

Обоснованность научных положений и выводов.

Научные положения и выводы, касающиеся особенностей кинематической и гидрологической структур вод Черного моря, формируемых потоками плавучести, получены автором диссертации с использованием современных методов математического моделирования (аналитического и численного). Обоснованность положений и выводов теоретического анализа подтверждается результатами лабораторных экспериментов во вращающемся бассейне, а также натурными исследованиями в Черном море.

Научная новизна.

В соответствии с предложенной автором диссертации халинной гипотезой, в настоящей работе выполнено подробное теоретическое и лабораторное моделирование особенностей кинематической и гидрологической структур вод, генерируемых потоками плавучести.

По результатам выполненного исследования впервые показано, что потоки плавучести, обусловленные распреснением рек и осолонением через пролив Босфор, формируют основные элементы крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

В диссертации получен новый результат о трехслойной системе течений, возбуждаемых потоками плавучести, с противотечением в слое главного пикноклина.

Впервые на основе выполненных инструментальных измерений и расчетов скорости течений в Черном море сделан вывод о возможности существования противотечения под ОЧТ с теоретически ожидаемыми характеристиками.

Теоретическая и практическая значимость.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ МГИ НАН Украины в рамках проектов "Черное море" (N ГР 0187.0018091, шифр 03.04) Общегосударственной комплексной программы исследования и использования Мирового океана в интересах науки и народного хозяйства на 1986-1990 гг., на перспективу до 2000 г.; "Черное море" (N ГР 0195U012256), "Среда" (N ГР 0194U035127) и "Наблюдения" (N ГР 0194U038247) Национальной программы исследований и использования ресурсов Азово-Черноморского бассейна, других регионов Мирового океана на период до 2000 г.

В диссертации разработаны новые теоретические положения, которые можно квалифицировать, как значительное достижение в области физики моря.

Практическая значимость результатов исследования заключается в необходимости учета потоков плавучести, как важного климатообразующего фактора, при прогнозе состояния морской среды и возможных изменений кинематической, гидрологической, гидрохимической, гидрооптической и гидробиологической структур вод Черного моря в связи с антропогенным воздействием на движущие силы потоков плавучести в виде зарегулирования стока рек черноморского бассейна.

Результаты настоящей работы могут быть рекомендованы для использования различными научными, гидрографическими, военными, рыбопромысловыми и другими организациями в научно-исследовательской работе, а также практике мореплавания, рыбного промысла, геологической разведки ископаемых и гидротехнического строительства.

Реализация и внедрение научных результатов.

Численная гидродинамическая модель Черного моря, разработанная автором диссертации, внедрена в качестве базовой модели в разработанную в 1986 г. ВЦКП "Орбита" ИК им В.М. Глушкова АН УССР автоматизированную систему диагноза и прогноза (АСДП) состояния Черного моря и использована при проведении комплексного эксперимента "Мониторинг Черного моря в июне-сентябре 1984 г."

Карты среднего многолетнего поля течений Черного моря, полученные диссертантом на основе диагностического расчета с использованием численной гидродинамической модели и климатического массива плотности морской воды, в 1987 г. внедрены в практику поисковых работ Южной морской инженерно-геологической экспедиции Министерства газовой промышленности СССР.

Акты внедрения численной гидродинамической модели и карт течений Черного моря прилагаются.

Апробация работы и публикации результатов.

Апробация результатов работы осуществлялась на семинарах отделов динамики океанических процессов МГИ НАН Украины и физической океанографии Вудс-Холльского океанографического института США, рабочих группах "Азово-Черноморский бассейн" МГИ НАН Украины, а также всесоюзных (2 Всесоюзная конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев", Москва, 1984; Всесоюзная конференция "Гидрология 2000 года", Москва, 1986; 3 съезд океанологов, Ленинград, 1987) и международных конференциях ("Проблемы Черного моря", Севастополь, 1992; 18 General Assembly of European Geophysical Society, Weisbaden, Germany, 1993; 17 Annual Workshop "Laboratory modelling of dynamic processes in ocean", Moscow, 1993; "Диагноз состояния Азово-Черноморского бассейна", Севастополь, 1993; American Geophysical Union fall meeting, San Francisco, USA, 1993; 19 General Assembly of European Geophysical Society, Grenoble, France, 1994; 26 International Liege Colloquium on ocean hydrodynamics, Liege, Belgium, 1994; 20 General Assembly of European Geophysical Society, Hamburg, Germany, 1995).

Полностью диссертация докладывалась и обсуждалась на семинарах отдела динамики океанических процессов МГИ НАН Украины и отдела крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы ИО РАН, а также гидрофизическом семинаре МГИ НАН Украины.

Основные результаты диссертации опубликованы в 24 работах, в том числе 16 научных статьях и 2 препринтах.

Личный вклад автора.

В совместно выполненных работах автор диссертации принимал непосредственное участие в подготовке теоретических моделей, проведении расчетов и геофизической интерпретации полученных результатов.

Личный вклад автора диссертации заключается также в организации и проведении лабораторных экспериментов во вращающемся бассейне лаборатории геофизической гидродинамики Вудс-Холльского океанографического института.

Кроме того автором диссертации самостоятельно выполнено планирование двух специализированных экспедиций, анализ архивных и вновь полученных инструментальных измерений полей скорости течений и плотности морской воды в Черном море.

Характеристика методологии исследования.

Теоретическое исследование особенностей циркуляции и стратификации морских вод, формируемых потоками плавучести, выполнено с использованием аналитических подходов, учитывающих балансные оценки и методы погранслоного анализа, а также численных моделей с использованием разностных схем, основанных на бокс-методе.

Лабораторное моделирование основных гидрофизических полей Черного моря во вращающемся лабораторном бассейне проводилось на основе теории подобия динамических процессов.

Для анализа особенностей вертикальной кинематической структуры вод Черного моря использовались материалы инструментальных измерений скорости течений и плотности морской воды из банка океанографических данных МГИ НАН Украины.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы — 327 страниц, в том числе 86 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований работ по теме диссертации.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение.

Во введении представлена общая характеристика работы, отраженная в разделе I данного автореферата. Здесь обсуждаются актуальность темы диссертации, цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость выполненного исследования. Приводится краткое изложение содержания диссертации по главам.

Глава 1: Основные гидрофизические поля и климатообразующие факторы.

Первая глава носит обзорный характер. Основная задача главы — отразить современный уровень знаний об особенностях гидрологической структуры вод и течений Черного моря по данным наблюдений и теоретических расчетов. Ее содержание основано на обзоре многочисленных публикаций, цитируемых в тексте диссертации.

Здесь приводится общее физико-географическое описание Черного моря. Дается представление об орографии берега и рельефе дна бассейна, элементах внешнего водообмена моря (речном стоке, осадках, испарении, расходах через проливы Босфор и Керченский).

Обсуждаются основные элементы крупномасштабной циркуляции вод Черного моря: общая циклоническая система поверхностных течений; струя Основного черноморского течения (ОЧТ) в прибрежной части моря интенсивностью порядка несколько десятков см/с; два макроциклонических круговорота в восточной и западной частях Черного моря, так называемые "очки Книповича".

Отмечается, что относительно вертикальной структуры течений черноморских вод существуют две различные точки зрения. Согласно однослойной гипотезы (Филиппов, 1968), единая циклоническая циркуляция сохраняется от поверхности до дна моря. Противоположная, двухслойная точка зрения (Neumann, 1942) предполагает циклонический тип циркуляции в верхнем 300-метровом слое и антициклоническую завихренность течений на нижележащих горизонтах с максимумом скорости на глубине около 1000 м.

Среди основных гидрологических особенностей Черного моря выделяются: резкая вертикальная стратифицированность черноморских вод с главным пикноклином на горизонтах 100–400 м; преобладающий вклад солености в распределение плотности морской воды.

Рассматриваются основные внешние воздействия, способные сформировать крупномасштабную циркуляцию и связанную с ней термохалинную структуру вод. В ряду главных внешних факторов отмечаются трение ветра на поверхности моря, потоки тепла и соли через открытые границы моря.

Глава 2: Обзор современных методов исследования механизмов формирования циркуляции и стратификации вод.

Вторая глава посвящена обсуждению различных гипотез и современных методов исследования вопроса об основных движущих силах,

формирующих крупномасштабную циркуляцию и стратификацию вод Черного моря.

В первом параграфе приводятся наиболее популярные гипотезы природы циркуляции. Отмечается, что имеются различные точки зрения на механизмы формирования наблюдающихся особенностей кинематической и гидрологической структур вод Черного моря. К уже существующим гипотезам, ветровой и термической, в работе (Булгаков, Коротаев, 1984) была высказана халинная точка зрения о возможности формирования основных элементов циркуляции и стратификации вод Черного моря потоками плавучести через открытые боковые границы бассейна, связанные с поступлением пресных речных и соленых мраморноморских вод.

В последующих разделах второй главы рассматриваются различные методы изучения вопроса природы циркуляции Черного моря с использованием теоретического (аналитического и численного) и лабораторного моделирования.

Отмечается, что в рамках численного моделирования исследование влияния раздельно действующих факторов (ветра, потоков плотности на поверхности и боковой границе) на генерацию крупномасштабной системы течений и гидрологической структуры вод Черного моря проводилось различными авторами: Кордзадзе (1986), Stanev (1988), Oguz et al. (1994), Рябцевым и Шапиро (1994), другими исследователями.

В этих работах было показано, что при действии ветра циклонического типа формируется общая циклоническая завихренность поверхностных течений (Кордзадзе, 1986; Рябцев, Шапиро; 1994). Данное внешнее воздействие в моделях с тонким пространственным разрешением и учетом рельефа дна генерирует вдольбереговой поток, типа ОЧТ, но не приводит к формированию главного пикноклина (Oguz et al., 1994).

Второе внешнее воздействие, потоки плотности на поверхности моря, может создавать стратификацию, но возбуждаемая в этом случае циркуляция нереалистична для условий Черного моря, поскольку на поверхности имеет ярко выраженный антициклонический характер (Stanev, 1988; Oguz et al., 1994).

Попытка исследования особенностей циркуляции, генерируемых потоками плавучести через боковые границы моря была предпринята в другой серии численных экспериментов. В работе (Oguz et al., 1994) циркуляция в первоначально покоящемся и стратифицированном море возбуждалась стоком рек и солеобменом через пролив Босфор. Пос-

кольку данный численный расчет был выполнен на ограниченный срок 3 года, то установившийся режим циркуляции получен не был. Кроме того вопрос формирования стратификации здесь не рассматривался.

Аналогичный численный эксперимент на более длительный период времени (410 лет) проводился в работе (Рябцев, Шапиро, 1994). Как отмечают авторы, установившийся режим поля течений здесь также не был получен. Это согласуется с оценками (Богуславский, Котовщиков, 1984; Мадерич, Эфроимсон, 1986), что время формирования современной гидрологической и связанной с ней кинематической структур вод Черного моря достигает нескольких тысяч лет.

Таким образом, сформулированная задача исследования особенностей циркуляции и стратификации вод Черного моря, формируемых потоками плавучести через открытые боковые границы моря (устья рек, проливы) в рамках численного моделирования на современном этапе не решена. В настоящей работе мы попытались ответить на этот вопрос с использованием других подходов и альтернативных методов исследования.

На основе обзора литературы во второй главе диссертации отмечено, что подавляющее большинство работ, посвященных решению настоящей проблемы, особенно советских исследователей, было сконцентрировано на численном моделировании. Аналитическому подходу уделялось незаслуженно мало внимания, а лабораторным моделированием крупномасштабных гидрофизических полей Черного моря до сих пор не занимались. Вместе с тем анализ результатов исследований, выполненных для других регионов Мирового океана, свидетельствует, что менее традиционные аналитический и лабораторный методы моделирования являются достаточно эффективными средствами изучения особенностей формирования кинематической и гидрологической структур вод. Поэтому в последующих главах диссертации уделено внимание всем трем обсуждавшимся методам исследования поставленной задачи с использованием аналитического, численного и лабораторного моделирования.

Глава 3: Аналитическое моделирование крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

В общем виде теоретическое исследование особенностей формирования циркуляции и стратификации вод потоками плавучести в первоначально однородной и покоящейся жидкости может основываться на решении общепринятой системы примитивных уравнений

движения, неразрывности и диффузии плотности в приближениях гидростатики и Буссинеска с соответствующими начальными и граничными условиями.

В третьей главе диссертации изучение данной проблемы начинается с рассмотрения более упрощенных математических постановок задач. Здесь обсуждается серия аналитических моделей различной сложности (0, 1, 2-мерных), в которых воспроизводятся основные элементы крупномасштабной кинематической и гидрологической структур вод Черного моря, как неизвестные функции соответствующей размерности. Общим для всех моделей является задание потоков плаучести на границах бассейна.

В первом разделе третьей главы формулируется нульмерная (боксовая) модель поля течений. В первом приближении Черное море представляется в виде двухслойного бассейна с поверхностной и глубинной водными массами, разделенными слоем халоклина. В соответствии с систематическим понижением солености в прибрежной области моря, связанным с распреснением рек, в поверхностном слое выделяется также центральная и периферийная водные массы, разделенные фронтальной зоной.

Задавая характерные значения солености трех типов вод, принимая условия постоянства количества воды и соли в каждом из выделенных боксов и учитывая элементы внешнего водо- и солеобмена (материковый сток, водо- и солеобмен через проливы Босфор и Керченский, осадки, испарения), на основе уравнений водного и солевого балансов проводятся количественные оценки и исследуется качественная схема внутреннего водообмена в Черном море.

В рамках предложенной модели, в частности, получено представление об особенностях вертикальных движений в море. В этом случае для прибрежной области характерно конвективное опускание вод и компенсирующий подъем в открытой части моря. Согласно выполненным оценкам, интенсивность вертикальных движений через слой халоклина составляет величину порядка 10^{-5} см/с.

Анализ, выполненный в нульмерной модели, позволил получить количественные оценки внутреннего водообмена в море при принятых характерных значениях солености центральной, периферийной и глубинной водных масс. Поэтому в следующей, одномерной модели была предпринята попытка рассчитать значения этих характеристик и выделить факторы, определяющие основные черты стратификации вод моря. При этом было использовано развитие подхода (Богуславский,

1978), заключающегося в применении одномерного уравнения диффузии соли, получающегося при интегрировании трехмерного уравнения по площади моря.

В нашем исследовании интегрирование проводилось отдельно для центральной и периферийной зон вследствие предполагаемой здесь системы разнонаправленных вертикальных движений. При заданных потоках соли на верхней и нижней границах моря система уравнений решалась аналитически. Аналогичный подход использовался для описания вертикальной термической структуры вод.

Полученные модельные вертикальные профили основных гидрологических характеристик сопоставляются с реальными наблюдениями в Черном море. Отмечается, что качественного и приближенного количественного описания характеристик стратификации удастся достигнуть даже в одномерной постановке задачи. Показано, что стратификация черноморских вод определяется, главным образом, обменом теплом и солью через пролив Босфор, причем для прибрежной зоны она существенно зависит от глубины поступления вод Мраморного моря через пролив Босфор.

В рассмотренной ранее нульмерной модели течений оценки скоростей были выполнены по заданному полю солености, при формировании которого неявно предполагалось влияние потоков соли на боковых границах моря. Для подтверждения этого были сформулированы и решены нижеследующие задачи, в которых исследовалось собственно влияние потоков плавучести на характер возбуждаемой циркуляции и гидрологической структуры вод.

В следующем приближении Черное море представляется в виде двухмерного канала, поскольку внешние возмущения в реальном бассейне сосредоточены на боковой границе, а структура течений имеет ярко выраженный погранслоиный характер. В силу этого рассматривается зональный, бесконечно глубокий открытый канал, заполненный покоящейся и линейно стратифицированной в начальный момент времени жидкостью. Для простоты анализа движение вод в канале генерируется потоками плавучести, равномерно распределенными вдоль боковых стенок.

Выбранная математическая постановка задачи, уравнения (1)-(5):

$$-fv = v\mu_{yy} \quad (1)$$

$$fu = -p_y + v\nu_{yy} \quad (2)$$

$$\rho = p_z \quad (3)$$

$$v_y + w_z = 0 \quad (4)$$

$$N^2 w = \kappa_x \rho_{zz} + \kappa_l \rho_{yy} \quad (5)$$

и граничные условия (6)–(8):

$$y = L: u = v = 0, \kappa_l \rho_y = \gamma \quad (6)$$

$$z = 0: w = \rho = 0 \quad (7)$$

$$z \rightarrow \infty: u, v, \rho \rightarrow 0 \quad (8)$$

представляют собой линейную модель пикноклина, предложенную Линейкиным и Мадеричем (1982), с тем отличием, что аномалии потока плотности γ , формирующие пикноклин, задаются в нашем случае не на поверхности канала, а на его боковых стенках. Здесь через ρ и p обозначены аномалии плотности и давления, $N^2 = \text{const}$ — квадрат частоты Вьяйсяля-Брента, соответствующей линейному распределению плотности с глубиной, а остальные обозначения общепринятые.

Задаваясь простейшим видом распределения потока плавучести в виде δ -функции:

$$\gamma = \gamma_0 [\delta(z - h_1) - \delta(z - h_2)], \quad (9)$$

где h_1 — глубина поступления пресных, h_2 — соответственно соленых вод, выполняя преобразование Фурье по вертикальной координате и используя технику Вишика-Люстерника (1957) погранслоного анализа, удается найти точное решение сформулированной задачи.

Анализ полученного решения показывает, что формируемая в этом случае циркуляция характеризуется следующими особенностями. Структура течений имеет погранслоный характер. На поверхности канала формируется узкоструйный вдольбереговой поток циклонического направления (берег справа), аналогичный ОЧТ в Черном море. Вертикальная структура течений в этом случае характеризуется трехслойным типом циркуляции с противотечением на горизонтах главного пикноклина (100–400 м). При выбранных значениях параметров задачи интенсивность циркуляции в ядрах течения и противотечения составляет 15–20 см/с. Горизонтальный масштаб потоков имеет величину порядка внутреннего радиуса деформации Россби (25–30 км для Черного моря).

В данной постановке обсуждаемая задача была обобщена на случай круглого моря и точно (несимметрично) действующих источников и стоков плотности. При этом решение представляется в виде ряда Фурье по угловой координате и выписывается система урав-

нений, соответствующая произвольной длине волны k . Оказывается, что независимо от формы бассейна и от вида потоков плавучести, действующих как точечные источники или осесимметрично расположенных вдоль боковой границы, структура течений идентична. Она имеет выше отмеченные особенности в следствие того, что главной, энергонесущей, является нулевая мода движения, определяемая средней интенсивностью потоков соли на единицу длины бассейна. Тогда как для более высоких длин волн интенсивность циркуляции на порядок слабее.

В следующем разделе третьей главы рассмотрено обобщение линейной модели на случай первоначально однородной жидкости. Кроме того с целью уменьшения числа плохо определяемых параметров моделирования (коэффициентов горизонтальной и вертикальной вязкости и диффузии, начальной стратификации), существенно влияющих на особенности формируемой циркуляции вод, здесь использовались безразмерные малопараметрические модели. Метод их получения заключается в следующем.

Если ввести характерные масштабы горизонтальной (U), вертикальной (W) скорости и давления (P)

$$U = \frac{(g\delta\rho H)}{(Lf\rho_0)}, \quad W = \frac{(g\delta\rho H^2)}{(L^2f\rho_0)}, \quad P = \frac{g\delta\rho H}{\rho_0}, \quad (10)$$

при известных масштабах перепада плотности ($\delta\rho$), горизонтального (L) и вертикального (H) размеров бассейна, то исходную стационарную (для крупномасштабных движений) систему уравнений гидродинамики можно переписать в следующем безразмерном виде:

$$Ro(uu_x + vv_y + ww_z) - v = -p_x + Ek\Delta u \quad (11)$$

$$Ro(uv_x + vv_y + ww_z) + u = -p_y + Ek\Delta v \quad (12)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (13)$$

$$p_z = \rho \quad (14)$$

$$Ro(u\rho_x + v\rho_y + w\rho_z) = PrEk\Delta\rho \quad (15)$$

Здесь числа Россби (Ro), Экмана (Ek) и Прандтля (Pr) представляют собой следующие безразмерные комбинации параметров:

$$Ro = \frac{U}{(Lf)} = \frac{(g\delta\rho H)}{(L^2f^2\rho_0)} \quad (16)$$

$$Ek = \frac{\nu_l}{(L^2 f)} = \frac{\nu_z}{(H^2 f)} \quad (17)$$

$$Pr = \frac{\kappa_l}{\nu_l} = \frac{\kappa_z}{\nu_z} \quad (18)$$

Анализ сформулированной задачи (11)–(15) в двухмерной постановке был выполнен отдельно для линейного ($Ro \ll PrEk$), квази- ($Ro \sim PrEk$) и нелинейного случаев ($Ro \gg PrEk$).

В заключительном параграфе третьей главы проведено обсуждение линейной малопараметрической модели течений и поля масс. Рассматривается двухмерный зональный канал, заполненный первоначально неподвижной и однородной по плотности жидкостью. Внешнее возмущение здесь задается в виде потоков плавучести, равномерно распределенных вдоль одной из боковых стенок как косинус-функция по вертикальной координате с максимальным опреснением на поверхности и осолонением у дна канала.

Линейная постановка допускает нахождение аналитического решения задачи. Анализ полученных решений показывает, что продольная составляющая скорости течения в данной постановке задачи определяется, главным образом, градиентом давления и имеет вид трехслойного по вертикали потока (течение–противотечение–течение) в области пристеночного погранслоя. При выбранных параметрах $H = 2 \cdot 10^5$ см, $L = 3 \cdot 10^7$ см и $\delta\rho/\rho_0 = 10^{-2}$, соответствующих гидрологическим условиям Черного моря, интенсивность циркуляции достигает нескольких десятков см/с.

Поперечно-вертикальная циркуляция в этом случае менее интенсивна. Качественные особенности движения вод в вертикальном сечении канала заключаются в том, что в пристеночной области верхней полуплоскости образуется ячейка циркуляции с вращением по часовой стрелке, а в нижнем слое формируется ячейка обратного знака вращения.

Потоки плавучести на боковой границе канала приводят к образованию резкой стратификации в первоначально однородной жидкости с формированием структуры расширяющегося пикноклина в области ядра противотечения.

Глава 4: Численное моделирование крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

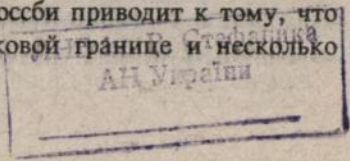
С целью проверки результатов линейной теории, а также дальнейшего изучения особенностей циркуляции и стратификации вод, формируемых потоками плавучести, в четвертой главе диссертации рассмотрены более сложные постановки задач и представлены результаты численного моделирования кинематической и гидрологической структур вод моря.

В двух первых разделах главы формулируются квазилинейная ($Ro \sim PrEk$) и нелинейная ($Ro \gg PrEk$) математические постановки задачи о формировании циркуляции и стратификации вод потоками плавучести на открытой границе двухмерного канала. Решения задач находятся с использованием численных методов.

В частности, решение квазилинейной постановки задачи представляется в виде суммы геострофической части решения и агеострофической добавки к ней. В этом случае решение во внутренней области канала определяется линейной постановкой задачи. Пограничные условия вблизи боковых границ описываются с использованием растянутых координат.

Вводя малый параметр $\epsilon = Ek^{1/2} \ll 1$ и пограничную переменную $\xi = y/Ek^{1/2}$, после оценки порядка величин неизвестных, для главных членов разложения выписывается соответствующая система уравнений. Ее особенность заключается в том, что она является обобщением модели (1)–(5) на случай переменного коэффициента $N^2(z)$, и ее решение априори неизвестно. Введением функции тока полных потоков полученная система уравнений сводится к уравнению шестого порядка для функции $\psi(y, z)$. Данное уравнение с соответствующими граничными условиями решается численно с использованием итерационного метода Зейделя.

Главная особенность полученного решения заключается в том, что основная структура горизонтальных и вертикальных движений сохраняется. Основное отличие от рассмотренного выше линейного случая задачи состоит в том, что поле скорости здесь реагирует на изменение параметров моделирования благодаря нелинейному взаимодействию характеристик. Так, уменьшение числа Россби приводит к тому, что прибрежные течения прижимаются к боковой границе и несколько интенсифицируются.



Аналогичная задача была решена также с использованием нелинейной системы уравнений. По-прежнему, рассматривается бесконечно длинный зональный канал, заполненный покоящейся и линейно стратифицированной жидкостью в начальный момент времени. Исследуется задача формирования циркуляции и стратификации вод потоками плавучести, равномерно распределенными вдоль одной из боковых стенок канала. Поступление пресных вод осуществляется в верхнем 10-метровом слое. Эквивалентный поток соленых вод — на промежуточных горизонтах 200–300 м.

Решение нелинейной задачи находится численно с использованием модели (Демышев, Коротаяев, 1989), типа модели (Вгуан, 1969), основанной на бокс-методе и адаптированной на случай двумерного канала. Здесь разностная система уравнений выводится на S -сетке и аппроксимирует исходную систему уравнений со вторым порядком точности по всем переменным. Используется явная схема "чехарда" с периодическим подключением схемы Матсуно для подавления слабой неустойчивости. Численная модель обеспечивает сохранение основных линейных и квадратичных инвариантов системы (массы, импульса, энергии). Параметры задачи были выбраны соответствующими гидрологическим условиям Черного моря. Для сохранения устойчивой стратификации используется процедура конвективного перемешивания жидкости в паре соседних боксов.

Численный эксперимент на пространственной сетке $\Delta y = 5$ км по горизонтали на 12 вертикальных горизонтах с шагом по времени $\Delta t = 20$ мин осуществлялся на максимально возможный срок (30 лет). Установившийся режим течений в бассейне получен не был, тем не менее основные элементы циркуляции к концу срока моделирования сформировались.

Так, в первоначально линейно стратифицированной жидкости формируется стратификация со слоем скачка плотности на горизонтах поступления соленых вод. Распределение плотности поперек канала в соответствии с ранее полученными теоретическими представлениями характеризуется расширением пикноклина с различными наклонами изоповерхностей в поверхностных и глубинных слоях, а также зоной максимальных вертикальных градиентов плотности, расположенной между ними. Структура течений соответствует ранее полученным результатам в линейной и квазилинейной постановках задач. Она носит узкоструйный и трехслойный по вертикали характер с противо-

течением на горизонтах главного пикноклина. Максимальные скорости формируемых потоков достигают 15–20 см/с.

Анализ, выполненный с использованием двухмерной теории, позволил получить представления об особенностях системы течений и гидрологической структуры вод, формируемых потоками плавучести в канале. Вместе с тем представляет интерес иметь более подробную информацию о пространственной трехмерной, в частности, вертикальной структуре течений в Черном море. Одним из возможных путей здесь является проведение диагностических расчетов по заданному из наблюдений полю плотности.

Такого рода численные эксперименты не дают ответ на основной вопрос физики моря о природе крупномасштабной циркуляции и стратификации вод, поскольку используемое здесь в качестве начального поле плотности в неявном виде уже содержит в себе весь комплекс внешних воздействий: трение ветра, потоки тепла и соли на границах бассейна. Вместе с тем, в силу того, что поле плотности в Черном море определяется, главным образом, распределением солёности, то диагностические расчеты можно рассматривать в качестве расчетов течений по уже сформировавшемуся трехмерному полю солёности.

При проведении настоящих расчетов применялись квазигеострофическая и нелинейная диагностические модели (Саркисян, 1977) и использовалось среднее многолетнее поле условной плотности (Герман, 1984), подготовленное на основе обобщения свыше 50000 гидрологических станций за период 1903–1982 гг. Климатические нормы гидрологических характеристик были получены для 10 стандартных горизонтов с дискретностью по горизонтали $40' \times 60'$ и проинтерполированы на сетку $10' \times 15'$.

По данным выполненных диагностических расчетов с использованием массива среднего многолетнего поля плотности и двух моделей проведено сопоставление полученных результатов. Обсуждаются преимущества использования нелинейной модели перед квазигеострофической для описания циркуляции вод на шельфе и области материкового склона Черного моря. Отмечается, что результаты диагностических расчетов подтверждают существование основных элементов крупномасштабной циркуляции на поверхности Черного моря (ОЧТ, "очки Книповича"). Особенности вертикальных движений в данных расчетах также соответствуют теоретическим представлениям об общем подъеме черноморских вод в открытой части и преобладающем опускании в периферийной зоне бассейна.

Вместе с тем циркуляция на глубинах Черного моря по данным диагностических расчетов носит сложный и неоднозначный характер. Другими словами, наличие подповерхностного противотечения в толще вод Черного моря обнаружено не было. В следствие того, что основной объем гидрологических измерений в Черном море проводился на достаточно крупных пространственных сетках (20 миль и более), а глубина зондирования редко превышала 500 м, высказано предположение о необходимости более частых и глубоководных зондирований для задачи исследования особенностей вертикальной структуры течений Черного моря.

Глава 5: Лабораторное моделирование крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря.

В пятой главе диссертации представлены результаты лабораторного моделирования крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря. Эксперименты проводились в лаборатории геофизической гидродинамики Вудс-Холльского океанографического института (США).

Лабораторная установка имела следующую конфигурацию. Использовался вращающийся с заданной частотой бассейн круглой формы, заполненный первоначально покоящейся и слабосоленой жидкостью. Вток пресных и более соленых вод в лабораторный бассейн осуществлялся из двух резервуаров посредством двух водяных насосов с регулируемыми расходами вод. Поступление пресных вод имело место на поверхности пристеночной области в одной фиксированной точке, либо осесимметрично через трубопровод, расположенный вдоль боковой границы. Аналогичным образом был организован вток более соленых вод на промежуточных горизонтах. Различные способы поступления вод создавались с целью проверки результатов линейной теории об эквивалентности действия локализованных и равномерно распределенных по границе бассейна потоков плавучести.

Для сохранения постоянного объема жидкости в центре бассейна предусматривался отвод избыточных вод в приемный бак, расположенный вне вращающейся установки.

Визуализация течений, формируемых потоками плавучести осуществлялась подкрашиванием жидкости с помощью различных красителей, а также техники фото- и видеосъемки. Измерение скоро-

стей течений проводилось посредством расчерченных на дне бассейна концентрических кругов и встроенным в видеоаппаратуру таймером.

Слежение за развитием стратификации в фиксированной точке бассейна осуществлялось методом отбора проб воды на 6 горизонтах шприцами различной длины и Anton-Paar денсиметра с точностью определения $\Delta\rho = 10^{-4}$ г/см³.

Для изучения влияния орографии берега на особенности циркуляции использовались две выпуклые металлические пластины, закрепленные к боковой стенке и моделирующие выступы Анатолийского побережья и Крымского полуострова.

Основные управляющие параметры для Черного моря и лабораторного бассейна, такие как горизонтальный (L) и вертикальный (H) масштабы водоема, параметр Кориолиса (f), перепад солёности (S) на вертикальном масштабе (h), расход вод (Q), коэффициенты вязкости (ν) и диффузии (κ), представлены в табл. 1.

Численные значения параметров подбирались следующим образом. Во-первых, чтобы обеспечить подобие динамических процессов в Черном море и лабораторном бассейне в смысле подобия безразмерных чисел Ro , Ek и параметра $q = Q/(fRLh)$, характеризующего интенсивность внешних воздействий, где $R = (\beta_s h)^{1/2}/f$ — радиус деформации Россби. Во-вторых, реализовать устойчивый режим циркуляции в соответствии с результатами Condie, Ivey (1988); Speer, Whitehead (1988); Chabert D'Hieres et al., (1991).

Предварительно была выполнена оценка времени формирования установившегося режима циркуляции и стратификации вод. Так, из безразмерных уравнений движения и диффузии плотности могут быть получены временные масштабы нелинейного взаимодействия $T_1 = (fRo)^{-1}$, вязкости $T_2 = (fEk)^{-1}$ и диффузии $T_3 = (fPrEk)^{-1}$. Тогда, согласно принятых значений параметров моделирования, характерный масштаб T_1 составит 12,5 часов для Черного моря и 13 секунд для лабораторной модели. Временные масштабы вязкости (T_2) — 300 лет и 3 часа, а диффузии соли (T_3) — 1500 лет и 1/3 года соответственно. Таким образом, выполненные оценки показывают возможность формирования квазиустановившегося режима циркуляции в лабораторных экспериментах в течении нескольких часов. Полное установление поля масс, вероятно, потребует существенно большего времени

Параметры моделирования и безразмерные числа

Параметры	Черное море	Лабораторный бассейн
L, см	$3 \cdot 10^7$	20
H, см	$2 \cdot 10^5$	10
f, с ⁻¹	10^{-4}	0,3
S, ‰	36	2,8
h, см	$3,5 \cdot 10^3$	2
Q, см ³ /с	$6 \cdot 10^9$	1
ν , см ² /с	10^5 (5)	10^{-2}
κ , см ² /с	$2 \cdot 10^4$ (1)	10^{-5}
Ro	0,2	0,2
Ek	10^{-6}	$3 \cdot 10^{-4}$
Pr	0,2	10^{-3}
q	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
T ₁ , с	$4,5 \cdot 10^4$	13
T ₂ , с	10^{10}	10^4
T ₃ , с	$5 \cdot 10^{10}$	10^7

(нескольких месяцев) даже для небольших линейных размеров лабораторного бассейна.

В лабораторных экспериментах начальным этапом было примерно 1/2-часовое раскручивание рабочей жидкости до твердотельного вращения. После этого осуществлялись внешние воздействия и начинался отсчет времени моделирования. Достижение квазиустановившегося режима контролировалось визуализацией вертикальной структуры горизонтальных течений, а также слежением за эволюцией вертикального профиля плотности. В части экспериментов не преследовалось достижение установления и результаты носили временной, неустановившийся характер.

Была выполнена серия экспериментов, включающая варьирование параметров моделирования, вида потоков плавучести (осесимметрично расположенных и локально действующих, формируемых потоками

тепла и соли), формы бассейна (цилиндрической и с орографией берега).

По результатам лабораторного моделирования установлено, что начальный (неустановившийся) режим характеризуется развитием единой циклонической системы течений с максимумом скорости на промежуточных горизонтах. Спустя несколько часов (6–10 часов в различных экспериментах) такая структура $u(z)$ трансформируется в трехслойный профиль. Циркуляция вод в поверхностных и глубинных слоях имеет вид вдольберегового потока циклонической завихренности. На промежуточных горизонтах формируется противотечение, предсказанное теоретически. При этом такой характер циркуляции не зависит от вида потоков плавучести, действующих как точечные источники или равномерно распределенных по границе бассейна.

Момент формирования квазиустановившегося режима циркуляции сопровождается также стационаризацией профиля плотности $\rho(z)$ с формированием пикноклина на глубине поступления соленых вод.

Как уже отмечалось ранее, одним из элементов крупномасштабной циркуляции вод Черного моря являются "очки Книповича". Предполагая, что они также формируются потоками плавучести и орографией берега, был выполнен следующий эксперимент. Выступы Турции и Крыма моделировались двумя выпуклыми пластинами, прикрепленными к боковой границе. В соответствии с условиями Черного моря источник пресных вод (р. Дунай, имеющей примерно 80% вклад в суммарный материковый сток рек черноморского бассейна) и соленых вод (пролив Босфор) были расположены в западной части бассейна. Под влиянием таких внешних воздействий в конце эксперимента, продолжавшегося 25 часов, в бассейне сформировалась классическая картина поверхностной циркуляции вод Черного моря с узким вдольбереговым потоком и двумя макроциклоническими круговоротами в западной и восточной областях.

Таким образом, по результатам лабораторного моделирования было получено подтверждение теоретических представлений о том, что потоки плавучести могут сформировать некоторые хорошо известные элементы крупномасштабной кинематической и гидрологической структур вод Черного моря. А именно, общую циклоническую завихренность поверхностных течений, струйный вдольбереговой поток, типа ОЧТ, "очки Книповича" и хорошо развитый пикноклин на промежуточных горизонтах. Вместе с тем результаты лабораторного

исследования также указывают на возможность трехслойной системы течений в Черном море с противотечением в слое скачка плотности.

Согласно теоретических оценок, подповерхностный поток может располагаться на горизонтах главного пикноклина (100–400 м), иметь горизонтальный масштаб порядка внутреннего радиуса деформации Россби (25–30 км), а максимальные скорости в его ядре достигать 15–20 см/с.

В соответствии с полученными результатами теоретического и лабораторного исследований в шестой главе диссертации проанализированы архивные и вновь полученные в специализированных экспедициях инструментальные измерения скорости течений и плотности морской воды в Черном море.

Глава 6: Особенности вертикальной структуры течений Черного моря.

В шестой главе представлены результаты анализа вертикальной структуры течений Черного моря по данным прямых инструментальных измерений и расчетов поля скорости с использованием динамического метода на основе информации, собранной в банке океанографических данных (БОД) МГИ НАН Украины.

Выполненный анализ наблюдений показал, что основной объем архивных гидрологических данных малоприменим для задачи исследования особенностей вертикальной структуры течений Черного моря, поскольку гидрологические измерения проводились, как правило, на достаточно крупных 20-мильных сетках, превышающих горизонтальный масштаб предполагаемого противотечения и естественный физический масштаб Черного моря (радиус деформации Россби). Кроме того максимальная глубина зондирования редко превышала 300–500 м, что, по-видимому, недостаточно для многослойной системы течений.

Из анализа инструментальных измерений скорости течений с использованием автономных буйковых станций (АБС) следует, что основной объем таких измерений недостаточен для решения сформулированной задачи. Так только 32 измерителя течений МГИ 1301 (ДИСК) из имеющихся в БОД более, чем 700 измерений скорости течений, были размещены на горизонтах главного пикноклина. Кроме того все АБС устанавливались без какой-либо предварительной инфор-

мации о существовании и положении достаточно узкой (25–30 км) струи противотечения.

Наконец, инструментальные измерения кинематических характеристик в Черном море с использованием зонда-профиломера ОЛТ, выполненные в августе 1992 г. (Кушнир и др., 1994), носили эпизодический характер. Зондирования акустическим доплеровским измерителем течений ADCP в апреле 1993 г. (Oguz et al., 1994) проводились недостаточно глубоко, не захватывая горизонты свыше 200 метров.

В диссертации отмечается, что результаты, полученные на основе анализа архивной информации, в целом, не противоречат гипотезе о трехслойной системе течений в Черном море. Противотечение с теоретически ожидаемыми характеристиками выявлено как по некоторым инструментальным измерениям с использованием АБС, ОЛТ и ADCP, так и по расчетам геострофической циркуляции на отдельных разрезах наиболее подробных гидрологических съемок. Однако, указывается, что получаемые при этом сведения имеют разрозненный и фрагментарный характер. В следствие этого возникла необходимость проведения целенаправленных натуральных исследований вертикальной структуры течений в Черном море.

Предварительно были сформулированы следующие основные требования к методике проведения такого рода динамических экспериментов. Из теоретических оценок шаг сетки не должен превышать 5–10 миль. Гидрологические измерения следует проводить глубже 500 м, возможно до дна моря, поскольку вопрос выбора нулевой динамической поверхности однозначно не решен. Наконец, буйковые постановки следует выполнять прицельно, после оперативной обработки судовых наблюдений.

Для задачи исследования особенностей вертикальной структуры течений Черного моря и проверки результатов теоретического анализа и лабораторного моделирования МГИ НАН Украины в 1993 и 1994 гг. были проведены две специализированные экспедиции.

15 рейс НИС "Трепанг" проводился в октябре–ноябре 1993 г. Район работ — северная часть Черного моря (экономзона Украины). Основная цель экспедиции — в двух произвольно выбранных участках Черного моря независимыми средствами измерений течений (ОЛТ, ДИСК) изучить особенности их вертикальной структуры в зоне ОЧТ.

Была использована следующая методика работ. Профилирование основных кинематических и гидрологических характеристик зондом

ОЛТ на сетке станций 5×10 миль осуществлялось от поверхности до глубин не менее 500 м. После оперативной обработки полученных данных и оценки общей динамической ситуации, в области струи ОЧТ были прицельно установлены две притопленные автономные буйковые станции (ПАБС) с девятью измерителями скорости течений ДИСК на горизонтах главного пикноклина. Общая продолжительность измерений на ПАБС составила 3 месяца. После подъема ПАБС и обработки результатов наблюдений было проведено сопоставление измерений двумя типами приборов.

По данным инструментальных измерений комплексом ОЛТ, подповерхностный поток восточного направления с характеристиками, соответствующими предполагаемому противотечению, был зафиксирован на всех восьми выполненных меридиональных разрезах. Он располагался под ОЧТ или в непосредственной близости к нему на горизонтах главного пикноклина (100–400 м). Максимальные скорости в его ядре достигали 20–25 см/с. Горизонтальный масштаб потока составил 10–20 миль. Была обнаружена как одно-, так и многоядерная структура потока.

В районе постановки ПАБС вертикальная структура течений, по данным ОЛТ, характеризовалась западным переносом вод в верхнем 100-метровом слое и юго-восточным потоком интенсивностью до 25 см/с на горизонтах 100–400 м. Согласно измерений на ПАБС, аналогичный поток, совпадающий по направлению и модулю скорости был зафиксирован приборами ДИСК. Такой поток, по данным ПАБС, существовал примерно в течении двух недель. Далее система течений, по-видимому, смеандрировала из мест постановки буйковых станций.

Таким образом, основной результат настоящей экспедиции состоял в том, что независимыми средствами измерений был обнаружен подповерхностный поток с ожидаемыми характеристиками противотечения. Вместе с тем результаты расчетов геострофической циркуляции отличались от данных инструментальных измерений. Изучению этого вопроса было уделено внимание в следующей специализированной экспедиции.

Экспедиция 32 рейса на НИС "Профессор Колесников" проводилась в декабре 1994 г. Одна из главных задач рейса заключалась в продолжении исследований вертикальной структуры течений зоны ОЧТ, поиске противотечения и изучении его характеристик. Большое внимание уделялось расчетам геострофической циркуляции и сопо-

ставлению расчетных данных с инструментальными измерениями (ОЛТ).

Работы выполнялись по следующей методике. Первоначально был выполнен макрополигон в северной части Черного моря на укрупненной сетке 10×20 миль. Зондирование комплексами ОЛТ и Исток-7 осуществлялось до 500 м. После оценки общей гидрологической обстановки был выбран наиболее спрямленный участок ОЧТ (район Южного берега Крыма) вдали от вихрей. На макрополигоне размером $40' \times 60'$ были продолжены более детальные исследования вертикальной структуры течений зоны ОЧТ. Использовалась учащенная сетка (до 2,5–5 миль) с глубоководными зондированиями свыше 1000 м, а при благоприятных погодных условиях — до дна моря.

Расчеты геострофической циркуляции на макрополигоне показали, что подповерхностный поток проявляется на отдельных разрезах. Важным результатом работ на макрополигоне явилось то, что благодаря использовавшейся методике более частых и глубоководных зондирований, подповерхностный поток был обнаружен на всех 4 меридиональных разрезах. По данным инструментальных измерений и расчетов геострофической циркуляции было обнаружено как общее качественное совпадение местоположений потоков вод восточного направления, так и количественное соответствие величин скорости течений (до 10–15 см/с).

Проведенный совместный анализ полей скорости течений и плотности морской воды показал, что в соответствии с теоретическими выводами в местах проявления противотечения выделяется особенность гидрологической структуры вод в виде расширения главного пикноклина, которая отражает немонотонность профиля скорости и вероятную смену знака циркуляции с глубиной.

Таким образом, результаты инструментальных измерений скорости течений и расчетов геострофической циркуляции, по данным двух специализированных экспедиций, подтверждают возможность существования в Черном море противотечения с теоретическими ожидаемыми характеристиками и показывают, что вертикальная структура черноморских вод, по-видимому, сложнее, чем предполагалось ранее. В диссертации отмечается необходимость продолжения изучения этого вопроса и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Заключение. В заключении диссертации представлены основные результаты и выводы выполненного исследования.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Обоснована гипотеза формирования крупномасштабной системы течений и стратификации вод Черного моря потоками плавучести через открытые боковые границы бассейна (устья рек, проливы).

2. Изучены особенности циркуляции и стратификации вод, формируемых потоками плавучести, с использованием комплекса математических моделей различной сложности и лабораторного моделирования на основе теории подобия динамических процессов в Черном море.

3. Показано, что потоки плавучести в виде поступления пресных вод на поверхности бассейна и соответственно соленых на нижележащих горизонтах формируют основные известные элементы крупномасштабной кинематической и гидрологической структур вод Черного моря (общую циклоническую систему течений в поверхностных и глубинных слоях; струю вдольберегового потока, типа ОЧТ; два макроциклонических круговорота в восточной и западной частях бассейна, аналогичные "очкам Книповича"; главный пикноклин на промежуточных горизонтах).

4. Установлено, что независимо от формы бассейна (двухмерный канал, круглое море) и вида потоков плавучести, действующих как точечные источники или осесимметрично расположенных вдоль боковой границы, вертикальная структура течений имеет трехслойный характер с противотечением в слое скачка плотности, а соответствующая гидрологическая структура вод характеризуется расширением главного пикноклина в области ядра противотечения.

5. Получено качественное представление об особенностях вертикальных движений вод, формируемых потоками плавучести, в виде двух разнонаправленных ячеек вертикальной циркуляции в поверхностных и глубинных слоях моря.

6. Исследована вертикальная структура течений и плотности морской воды по архивным данным инструментальных измерений в Черном море и результатам двух специализированных экспедиций 1993 и 1994 гг. Показана возможность существования в Черном море подповерхностного потока с теоретически ожидаемыми характеристиками противотечения. Согласно теоретических оценок и данных наблюдений, противотечение может располагаться примерно под ОЧТ на глубинах 100–400 м, иметь горизонтальный масштаб порядка внутрен-

него радиуса деформации Россби (20–30 км) и максимальную скорость в ядре до 10–20 см/с.

7. Сделан вывод о важной роли потоков плавучести, как климатообразующего фактора циркуляции и стратификации вод Черного моря по результатам выполненного комплексного исследования, включающего теоретическое и лабораторное моделирование, а также анализ натуральных данных.

8. Сделано заключение, что существование рек и проливов в большинстве внутренних морей, наличие общих черт циркуляции и стратифицированность вод могут свидетельствовать о важной роли изучаемого внешнего воздействия и в других регионах Мирового океана.

9. Отмечено, что активное вмешательство в движущие силы Черного моря в виде зарегулирования стока рек, по-видимому, может серьезно повлиять на изменение динамического режима черноморских вод в крупномасштабном плане и привести к различным негативным последствиям в виде изменения положения верхней границы сероводородной зоны, уменьшения биологических запасов моря и общего ухудшения качества морской воды.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Влияние стока рек на стационарную циркуляцию внутренних морей (на примере Черного моря). // В кн.: Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М. Наука. 1985. С. 293-298.
2. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Роль халинных факторов в формировании циркуляции вод Черного моря. // В кн.: Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М. Наука. 1989. С. 71-79.
3. Булгаков С.Н. Численное моделирование синоптической изменчивости вод Черного моря. // В кн.: Исследование и моделирование гидрофизических процессов в Черном море. М. Гидрометеиздат. 1989. С. 122-130.
4. Bulgakov S.N., Demyshev S.G., Korotaev G.K. Modelling of the Black Sea circulation and water stratification (review). // In: Problems of the Black Sea. Sevastopol. 1992. P. 34-53.

5. Булгаков С.Н., Иванов В.А., Коротаев Г.К. Неизвестное противотечение в Черном море. // Доклады АН Украины. Киев. 1994. N12. С. 110-114.
6. Булгаков С.Н. Применение плотностных моделей для диагностических расчетов океанических течений. // Морские гидрофизические исследования. Севастополь. 1978. Вып. 3. С. 78-85.
7. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Возможный механизм стационарной циркуляции вод Черного моря. // Комплексные исследования Черного моря. Севастополь. 1984. С. 32-40.
8. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Одномерная модель вертикальной стратификации вод Черного моря. // Комплексные исследования Черного моря. Севастополь. 1984. С. 41-50.
9. Булгаков С.Н., Гертман И.Ф. Исследование климатической горизонтальной циркуляции вод Черного моря в рамках диагностической модели. // Морской гидрофизический журнал. 1986. N3. С. 6-13.
10. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Диагностический расчет климатической циркуляции черноморских вод на основе полной нелинейной модели. // Морской гидрофизический журнал. 1987. N1. С. 7-14.
11. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К. Аналитическая модель струйной циркуляции в замкнутых водоемах. // Морской гидрофизический журнал. 1987. N3. С. 18-24.
12. Айвазян С.Р., Булгаков С.Н. Линейная аналитическая модель установившихся течений в проливе Босфор. // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь. 1989. С. 93-104. (Aivazjan S.R., Bulgakov S.N. A linear analytical model for stable currents in the Bosphorus. // Complex oceanogr. research of the Black Sea. Utrecht. Tokyo. 1992. P. 71-79.)
13. Булгаков С.Н. Модель водообмена через пролив Босфор (гидродинамическая оценка условий запираания нижнебосфорского течения). // Морской гидрофизический журнал. 1990. N1. С. 10-15. (Bulgakov S.N. Model of the water exchange through the Bosphorus (a hydrodynamic estimate of blocking conditions for the Bosphorus undercurrent). // Soviet J. of Physical Oceanography. 1991. 5(1). P. 171-178.)
14. Булгаков С.Н. Особенности интегральной циркуляции в проливах. // Морской гидрофизический журнал. 1992. N1. С.

- 19-26. (Bulgakov S.N. Peculiarities of the depth-integrated circulation in the straits. // Soviet J. of Physical Oceanography. 1993. 4(1). P. 15-20.)
15. *Булгаков Н.П., Булгаков С.Н.* Проявление противотечения в Черном море в полях плотности воды и гидростатического давления. // Морской гидрофизический журнал. 1995. N4. С. 63-77.
16. *Булгаков Н.П., Булгаков С.Н.* Динамический метод расчета течений и анализ вертикальной кинематической структуры. // Морской гидрофизический журнал. 1995. N6. С. 41-52.
17. *Булгаков С.Н., Коротаев Г.К.* Моделирование крупномасштабных особенностей динамики и структуры вод Черного моря. // Препринт МГИ АН УССР. Севастополь. 1989. 42 с.
18. *Булгаков С.Н.* Динамика длинных и сильно-стратифицированных проливов. // Препринт МГИ АН Украины. Севастополь. 1993. 32 с.
19. *Bulgakov S.N., Korotaev G.K., Whitehead J.A.* Salt flux as a mechanism of large-scale circulation in the Black Sea. // Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report. 1994. No WHOI94-05. PO-2.
20. *Булгаков С.Н., Коротаев Г.К.* Природа крупномасштабной циркуляции внутренних морей. // Тезисы докладов третьего съезда океанологов. Секция: Полярная и региональная океанология. Л. Гидрометеиздат. 1987. С. 49.
21. *Bulgakov S.N., Korotaev G.K., Whitehead J.A.* Salt flux as a mechanism of large-scale circulation in the Black Sea. // American Geoph. Union. San Fransisco. 1993. P. 358.
22. *Bulgakov S.N., Korotaev G.K., Whitehead J.A.* Theoretical and laboratory modelling of the Black Sea large-scale circulation. // 17 Annual Workshop: Laboratory modelling of dynamical processes in oceans. Moscow. 1993. P. 22.
23. *Bulgakov S.N., Korotaev G.K., Whitehead J.A.* Salt flux as a mechanism of large-scale circulation in the Black Sea. // European Geoph. Society. 18 General Assambly. Weisbaden. 1993. Part 2. C137.
24. *Bulgakov S.N., Korotaev G.K.* Prediction and observation of the buoyancy flux induced deep counter-current in the Black Sea. // 26 Liege Coloquium on ocean hydrodynamics. Belgium. 1994. P. 8.

Булгаков С.Н. "Формирование крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Черного моря. Роль потоков плавучести". Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.12 — геофизика. Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 1996.

Защищаются 24 научные работы, которые содержат результаты исследования особенностей циркуляции и структуры вод, формируемых потоками плавучести в Черном море. Выполнено теоретическое и лабораторное моделирование, а также анализ инструментальных измерений скорости течений и плотности морской воды. Выявлен трехслойный по вертикали тип горизонтальных движений, формируемых потоками плавучести. Отмечена важная роль потоков плавучести в генерации крупномасштабной системы течений и стратификации вод Черного моря.

Ключевые слова: Черное море, потоки плавучести, течение, противотечение, главный пикноклин.

Bulgakov S.N. "Black Sea large-scale circulation and water stratification formation. Buoyancy fluxes role." Theses for obtaining scientific degree of Doctor of Physics and Mathematics. Speciality 01.04.12 — Geophysics. Marine Hydrophysics Institute, Sevastopol, 1996.

24 scientific papers are defended, which contain the study results of patterns of the buoyancy flux induced circulation and water structure in the Black Sea. The theoretical and laboratory modelling coupled with analysis of current meter and CTD measurements were carried out. The three-layered vertical structure of buoyancy flux induced circulation is suggested. An important buoyancy flux role is noted for the Black Sea large-scale circulation and stratification forming.

Key words: Black Sea, buoyancy fluxes, current, undercurrent, main pycnocline.

Ключові слова: Чорне море, потоки плавучості, течія, протитечія, головний пікноклін.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 19.01.96 Формат бумаги 60x90 1/16
Объем 2,3 уч. изд. л. Заказ 6. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПУ ЭКОСИ-Гидрофизика
335000, Севастополь, ул. Ленина, 28

445823

AB 34365
AB 34.365