

1 эш
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Батов Владимир Иванович

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

II.00.08 - океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Изменчивость гидрофизических полей в океанах и морях во многом зависит от их вертикальной термохалинной структуры. Закономерности её образования и развития в условиях открытого океана в различных временных масштабах изучены достаточно полно и это отражено в большом количестве работ (Монин, Каменкович, Корт / 1974 /, Федоров / 1976 /, Калацкий / 1978 /, Пивоваров / 1978 / и др.).

В гораздо меньшей степени исследована изменчивость вертикальной структуры внутренних морей. Эта научная тема в океанологии в последнее время стала особенно актуальной в связи с тем, что внутренние моря, в силу своей обособленности, испытывают на себе сильное влияние народнохозяйственной деятельности человека. Анализ "реакции" моря на нее позволяет более ясно представить последствия подобного воздействия на Мировой океан в целом.

Росту заинтересованности в изучении внутренних морей способствуют и традиционные в океанологии задачи, связанные с акустикой, с обеспечением рыбного промысла, хозяйственного освоения минеральных и сырьевых ресурсов морей.

Все оказанное выше в большой степени относится и к изучению структуры термогидродинамических полей Черного моря. Интенсивный рост исследований вод этого моря, который можно наблюдать по океанологической литературе, обусловлен еще и тем, что в последнее время резко возросло число случаев обнаружения значительных концентраций сероводорода в верхних слоях моря, что приводит к негативным явлениям в виде заморов. Возникла необходимость оценки смещения верхней границы сероводородной зоны в Черном море. Из-

Работа выполнена в Государственном океанографическом институте

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Калацкий В.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Кеонджян В.П.
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Реснянский Ю.Д.

Ведущая организация: физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова

Защита диссертации состоится "31" марта 1987 г.
в 17⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К 024.02.01
по присуждению ученой степени кандидата физико-математических
наук в Государственном океанографическом институте по адресу:
119838 Москва, Кр

С диссертацией

Автореферат раз

Ученый сек
специализиров
кандидат геогра

И.В.



менчивость последней во многом связана с процессами, происходящими в поверхностном слое моря.

В связи со всем перечисленным выше представляется актуальным исследовать основные процессы, формирующие термохалинную структуру верхнего, наиболее динамичного, деятельного слоя этого моря и создать математическую модель её эволюции.

Цель и задачи работы:

- Рассмотреть особенности формирования термохалинной структуры деятельного слоя моря в сезонном и синоптическом масштабах изменчивости;
- Определить относительный вклад потоков тепла и солей в формирование плотностной структуры верхнего слоя моря;
- На основе результатов анализа гидрометеорологического режима моря разработать модель, воспроизводящую основные черты сезонной и синоптической изменчивости термической структуры деятельного слоя моря;
- Оценить вклад адвекции тепла дрейфовыми и квазигеострофическими течениями в тепловой баланс верхнего слоя и её влияние на изменчивость характеристик верхнего слоя;
- На основе натурных и модельных экспериментов провести исследование формирования структуры гидрофизических полей во фронтальной области между водами шельфа северо-западной части и глубоководными районами моря;
- Выяснить роль трансфронтального обмена между этими районами и степень его влияния на изменения структуры термохалинных полей в этой области.

Фактический материал и методы исследования. В работе, при изучении сезонной изменчивости термической структуры деятельного слоя

моря, были использованы следующие гидрометеорологические данные:

- обобщенные данные регионального банка гидрологической информации Черного моря, созданный в СО ГИИН / Гертман, 1986 /, о климатических среднемесячных значениях температуры и солености на стандартных горизонтах в узлах регулярной сетки 40x40 миль;
- данные о среднемесячных климатических значениях теплового баланса моря / Голубева, 1986 / и атмосферного давления / Альтман и др., 1984 / также подготовленных в СО ГИИН;
- данные "Справочника по климату Черного моря" / под ред. Соркиной, 1974 /;
- данные о компонентах скорости течения, полученные расчетным путем по квазигеострофической диагностической модели Саркисяна / Соколов и др., 1986 /.

При исследовании синоптической изменчивости термической структуры верхнего слоя и строения термохалинных полей во фронтальной области были использованы материалы трех комплексных экспедиций 1984-1985 гг. на Черном море, в планировании и проведении которых автор принимал непосредственное участие.

При обработке данных натурных наблюдений использованы методы полиномиальной (сплайновой) интерполяции, статистического и спектрального анализа.

При реализации математических моделей для расчетов на ЭВМ применялись численные методы решения дифференциальных уравнений. Составленные программы написаны на алгоритмическом языке "FORTRAN-IV" и реализованы на ЭВМ серии ЕС и CDC-172 "CYBER".

Научная новизна работы.

Впервые для воспроизведения основных черт изменчивости термической структуры деятельного слоя глубоководной части Черного

моря в сезонном и синоптическом масштабах построена и верифицирована на материалах наблюдений численная нестационарная модель, описывающая процессы локального перемешивания и адвективного перераспределения тепла.

II. Исследованы основные особенности трансфронтальной (поперечной) циркуляции на шельфовом гидрологическом фронте с применением диагностической гидродинамической модели, основанной на уравнениях в "примитивном" виде.

III. На основе модельных расчетов получены следующие результаты.

Оценен вклад потоков тепла и солей в формирование поля плотности деятельного слоя.

Определены вклады процессов локального перемешивания и адвективного перераспределения тепла, переносимого дрейфовыми и квазигеострофическими течениями, в формирование вертикальной термической структуры верхнего слоя моря.

Исследованы основные черты трансфронтальной циркуляции на шельфовом фронте в летний и зимний сезоны.

IV. По данным вертикального зондирования температуры и солености в летний период оценены потоки тепла и солей в зоне фронтального раздела, обусловленные размыванием элементов тонкой структуры процессами двойной диффузии.

Практическая ценность. Разработанная модель может применяться для исследования особенностей термической структуры деятельного слоя в океанах и морях. При некоторой модификации модель может служить в качестве подсчетной для учета эффектов взаимодействия океана и атмосферы в моделях крупномасштабной циркуляции.

При обеспечении необходимыми входными данными модель может быть в дальнейшем использована для прогноза вертикальной терми-

ческой структуры верхних слоев океанов и морей.

Результаты работы могут найти практическое применение при планировании натурных экспериментов по изучению процессов в верхнем слое, во фронтальных областях, при изучении и моделировании биологических и биохимических процессов, при решении экологических задач, а также использоваться для нужд рыбопромышленного хозяйства и подводной акустики.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинарах отдела динамики моря ГОИН (1983-1987);

На конференциях молодых ученых и специалистов ГОИН (1985), ВНИИГМИ-МЦД (1984-1986), ЛГМИ (1985), ГМЦ СССР (1985), ИОАН (1985);

На Всесоюзных координационных совещаниях-семинарах "Гидродинамическое моделирование и экспериментальные исследования режима морей СССР" (Севастополь, 1984, Одесса, 1986);

На II Всесоюзной конференции "Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов" (Севастополь, 1985);

На III Всесоюзной научной конференции по проблемам промышленного прогнозирования (долгосрочные аспекты) - (Мурманск, 1986);

На Всесоюзном совещании-семинаре "Изучение гидрометеорологического режима шельфовой зоны морей и гидрометеорологическое обеспечение деятельности народнохозяйственных организаций на континентальном шельфе СССР" (Москва, ВДНХ СССР, 1986).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 177 страниц, включая 123 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 8 таблиц и списка литературы из 100 наименований, из которых 37 принадлежат иностранным авторам.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводится краткое ее содержание, определяются основные цели и задачи исследования.

Первая глава посвящена описанию использованных при выполнении диссертации материалов наблюдений, методов их обработки и анализу гидрометеорологического режима Черного моря.

В первом параграфе главы дано подробное описание основных натуральных данных, использованных в работе. Краткая их характеристика была приведена в настоящем автореферате несколько выше.

Описанию методов обработки данных наблюдений посвящен второй параграф. Основная часть данных о термохалинной структуре деятельного слоя моря представлена в виде полей температуры и солености на стандартных, неравномерно распределенных по глубине горизонтах. В то же время для задания начальных условий в дифференциальной модели требуется задание этих параметров с равномерным шагом по глубине 1-2 м, для чего в работе проведена интерполяция с применением рациональных сплайнов / Белкин, 1983 /.

При подготовке массивов исходной гидрометеорологической информации для задания граничных условий в модели необходимо проводить интерполяцию в узлы расчетной сетки. Задача пространственной интерполяции, как и в одномерном случае, достаточно эффективно решается с помощью сплайн-функций. Для этого использовался метод, предложенный Свэйном / Swain, 1976 /.

При обработке данных наблюдений, полученных с помощью измерительного комплекса АЦИТТ, и имевших по тем или иным причинам пропуски во временных рядах до 20-30% от общей длины ряда, ис-

пользовался метод восстановления пропусков наблюдений / Батов, Привальский, Соколов, 1985 /. Он основан на аппроксимации временного ряда, из которого получена выборка, авторегрессионной моделью конечного порядка.

В третьем параграфе первой главы приводится анализ гидрометеорологического режима моря. Его результаты позволили установить, что в Черном море выделяются два основных района, обладающих принципиальными различиями в гидрологическом режиме. Это мелкий северо-западный, характеризующийся как эстуарно-шельфовый бассейн, и центральный глубоководный район. Создание единой математической модели, способной воспроизвести изменчивость термической структуры обоих регионов, хотя и принципиально возможно, но сложно в реализации и не оправдано с точки зрения значительных затрат машинного времени для расчетов на ЭВМ. Поэтому основное внимание в этом параграфе уделено анализу гидрометеорологического режима глубоководной части моря, для которой в дальнейшем строилась математическая модель верхнего слоя.

Анализ гидрометеорологического режима глубоководной части моря позволил установить основные механизмы, формирующие изменчивость термической структуры деятельного слоя, которые необходимо учитывать при разработке математической модели. Среди них наиболее принципиальными являются следующие.

Основным фактором, определяющим формирование плотностной структуры верхнего слоя глубоководной части моря, является режим температуры, вклад которой примерно в 5 раз превосходит вклад солености / Блатов и др., 1984 /. Поля температуры и солености в верхнем слое не коррелированы между собой, что позволяет рассматривать процессы формирования термической структуры

моря отдельно от халинной.

В течение всего года для деятельного слоя глубоководной части моря характерна устойчивая плотностная стратификация, несмотря на то, что в холодное время года (~с ноября по март) в вертикальном распределении температуры наблюдается инверсия, которая компенсируется вкладом солености. Этот факт требует учета при формулировке математической модели. В простейшем случае можно рассматривать изменения температуры при постоянном во времени вертикальном распределении солености по вертикали.

Влияние режима солености на изменения плотности верхнего слоя становится определяющим в переходные сезоны, в особенности осенью, в момент перехода к конвективному заглублению верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Вклад потока солей в поток массы в этот период возрастает, в зависимости от региона, до 60-100%. Поэтому для более адекватного воспроизведения с помощью математической модели сезонной изменчивости в этот период нужен учет потока солей. При воспроизведении синоптической изменчивости характеристик верхнего слоя в определенных метеорологических ситуациях вклад потока солей может значительно превосходить климатическую норму и его учет становится принципиально важным.

В центральных районах моря выделяются два типа формирования толщины ВКС - летний и зимний. В летний период толщина ВКС в основном совпадает с толщиной экмановского погранслоя, а зимой определяется интенсивностью конвективного перемешивания и может значительно деформироваться под влиянием крупномасштабных вертикальных движений вод моря.

Оценки вклада адвекции тепла течениями, полученные на основе балансовых расчетов / Солянкин, Осадчий, 1962; Гертман, 1986 /, по-

казывают, что локальный баланс тепла достаточно хорошо выполняется для центральных районов моря. В прибрежных районах вклад адвективной составляющей теплового баланса более значительный и достигает примерно 20%.

Во второй главе формулируется математическая модель вертикального перемешивания в дифференциальной форме. Модель включает в себя уравнения движения (чисто дрейфовые, экмановского типа), турбулентной диффузии тепла, баланса энергии турбулентности. Коэффициент турбулентной теплопроводности принимался пропорциональным коэффициенту турбулентной вязкости, а масштаб турбулентности задавался постоянным. При реализации модели для уравнения баланса энергии турбулентности использовалось решение, полученное Калацким / Калацкий, 1978 / методом сращивания асимптотических разложений.

Для воспроизведения изменений термической структуры деятельного слоя в период охлаждения использовалась модель, описывающая процесс непроникающей конвекции / Зилитинкевич, Реснянский, Чаликов, 1978 /:

$$b = C_1 (g \alpha_T Q h)^{2/3}$$

$$\partial_t \rho = \partial_z K_p \partial_z \rho$$

$$K_p = 0,1 h b^{1/2}$$

где h - толщина ВКС, α_T - коэффициент термического расширения,

Q - поток тепла, g - ускорение свободного падения, b - энергия турбулентности, C_1 - константа. При этом считалось, что изменения вертикального профиля плотности происходят только под действием потока тепла, а изменения профиля солености во времени пренебрежимо малы. Поэтому профиль температуры определялся из уравнения

состояния в линейном приближении:

$$T(z) = (1 + \beta S(z) - \rho(z)/\rho_0) \alpha_T^{-1}$$

где β - коэффициент соленостного сжатия.

Используя среднемесячные климатические данные о температуре и солености деятельного слоя, скорости ветра и теплового баланса моря, с помощью сформулированной модели были проведены расчеты межмесячных изменений характеристик верхнего слоя, которые показали следующее. Ошибки расчетов температуры в центральных районах моря составляют примерно 0.5°C и не превышают 67% от среднеквадратического отклонения температуры поверхностного слоя. В прибрежных районах ошибки достигают $1.0-2.5^{\circ}\text{C}$ и объясняются в основном неучтенным в модели влиянием адвективного потока тепла. Ошибки расчетов толщины ВКС в теплое время года (апрель-август) составляют в среднем 2 м. В начале периода охлаждения (сентябрь-ноябрь) они возрастают до 5-10 м, оставаясь при этом в пределах точности инструментального определения глубины залегания нижней границы ВКС. К моменту максимального развития зимней конвекции (февраль-март) максимальные ошибки расчета толщины ВКС возрастают до 20-30 м, что объясняется отсутствием учета в модели изменений толщины ВКС под влиянием вертикальных движений вод моря.

В описанной выше модели в уравнении турбулентной диффузии тепла были опущены члены вида $U\partial_x T$, $V\partial_y T$, описывающие горизонтальную адвекцию. Однако, как было показано в первой главе, значение адвективной составляющей теплового баланса деятельного слоя находится в пределах 10-20% в прибрежных районах, где ошибки расчетов особенно велики. Поэтому в последующих расчетах межмесячных изменений термической структуры моря в модель были включены указанные выше члены уравнения $U\partial_x T$, $V\partial_y T$ в качестве своеобразных

"адвективных добавок". Учет адвективной составляющей теплового баланса проводился отдельно для дрейфовых и суммарных квазигеострофических течений. В первом случае в качестве компонент скорости течения использовались составляющие полного дрейфового потока $S_x = \tau_y / f \rho_0$, $S_y = -\tau_x / f \rho_0$, нормированные на толщину перемешанного слоя h . Здесь τ_x , τ_y - компоненты касательного напряжения ветра, f - параметр Кориолиса. Во втором случае в расчетах использовались данные о компонентах скоростей течений, полученные по диагностической квазигеострофической модели Сарки-яна / Соколов и др., 1986 /.

Расчеты показали, что учет адвекции тепла дрейфовыми течениями в среднем не приводит к уменьшению ошибок расчета температуры ВКС по сравнению с результатами, полученными по одномерной модели. При учете адвективного потока тепла, переносимого суммарными квазигеострофическими течениями, средняя по акватории моря ошибка расчетов уменьшается в среднем на 0.1°C . При этом уменьшается и среднеквадратическое отклонение ошибки примерно на 0.05°C . Однако в прибрежных областях ошибки расчетов остались довольно значительными - до $1.0-2.0^{\circ}\text{C}$. По-видимому, течения, рассчитанные по квазигеострофической модели, не адекватно описывают существующую в этих районах циркуляцию. В расчетах по этой модели не удастся получить здесь Основное черноморское течение, известное из наблюдений. Поэтому для получения более точных оценок адвективного потока тепла в этих районах для расчета течений необходимо применение более сложных гидродинамических моделей, основанных на принципах четырехмерного анализа.

Далее в работе с помощью численных расчетов по модели подтверждены качественные оценки, сделанные в первой главе. Показа-

но, что влияние потока солей на изменение плотностной структуры верхнего слоя является преобладающим в переходные сезоны. Так осенью, при учете в расчетах потока солей, момент перехода к конвективному заглублению ВКС может наступать примерно на две недели позже по сравнению со сроком начала конвекции без его учета.

Для исследования синоптической изменчивости термической структуры деятельного слоя моря был проведен специализированный натурный эксперимент в период с 24 мая по 11 июня 1985 г. в западной части Черного моря. Измерения выполнялись на НИС "Я.Гаккель", принадлежащем ОдО ЛОИИ. В состав гидрологических работ в эксперименте входило: измерение температуры, солености и компонент скорости течения на трех буйковых станциях, выполнение через каждые 6 часов полного комплекса стандартных гидрометеорологических наблюдений на многосуточной станции, проведение через каждые 3 суток площадных съемок термохалинных полей вокруг многосуточной станции на микрополигоне размерами 20х30 миль. По результатам съемок удалось установить, что в период прогрева вклад изменений температуры примерно в три раза превосходит вклад изменений солености в формирование плотности верхнего слоя. Толщина ВКС в этот период составляла в среднем 7 м и соответствовала оценке толщины экмановского погранслоя. Среднеквадратическое отклонение толщины ВКС составляло ~ 2 м. На основе данных инструментальных наблюдений были определены средние пространственные градиенты температуры и вычислены среднесуточные значения компонент скорости течения. С их помощью удалось оценить влияние адвекции тепла на изменения температуры ВКС. Ее вклад в среднем составил 10-20%, испытывая за время на-

блюдений колебания от 3-5% до 30-40% от максимального в реализации суточного изменения температуры ВКС.

По данным о тепловом балансе, скорости ветра и вертикальном распределении температуры на многосуточной станции с помощью одномерной модели были проведены расчеты синоптической изменчивости термической структуры деятельного слоя моря.

Численные эксперименты показали, что при расчетах по модели без учета адвекции тепла максимальные ошибки составили 1.5-1.7°C по температуре и 3-4 м по толщине ВКС. При замене через определенные промежутки времени рассчитанного по модели вертикального профиля температуры наблюдаемым на многосуточной станции косвенно учитывается влияние адвекции тепла течениями. В численных экспериментах проведение такой замены через 6 и 3 суток позволяет снизить ошибки расчетов, которые составили соответственно 0.5-0.6°C и 0.1-0.2°C по температуре и 2-3 м по толщине ВКС.

В заключительном численном эксперименте проводились расчеты с учетом адвективных изменений температуры, которые были определены по данным инструментальных измерений меридионального и зонального градиентов температуры и среднесуточных значений значений компонент скорости течения. Среднесуточные значения произведений соответствующих величин пространственных градиентов температуры и компонент скорости течения суммировались с результатами расчета температуры ВКС через каждые 3 суток. Это позволило уменьшить ошибки расчетов до 0.1-0.2°C по температуре и до 2-3 м по толщине ВКС.

В третьей главе представлены результаты натурных и модельных исследований термогидродинамических процессов в зоне шельфового фронта северо-западной части моря.

В первом параграфе главы дается краткая характеристика гидрометеорологического режима северо-западной части моря. При этом отмечаются принципиальные различия в строении термохалинной структуры вод глубоководного и шельфового районов, которые позволяют различать в Черном море две крупномасштабные водные массы, естественная граница соприкосновения между которыми выражена в виде фронтальной зоны. (Понятие фронтальной зоны и другие определения даны согласно монографии К.Н.Федорова / Федоров, 1983 /). Основной фронтальный раздел связан с системой Основного черноморского течения, локализуется примерно вдоль свала глубин и принадлежит к типу плотностных фронтов. Изменчивость процессов на гидрологическом фронте относится к синоптическому масштабу / Каменкович, Кошляков, Монин, 1982 /, и во многом связана с процессами трансфронтального обмена, определяющими взаимодействие между водами континентального шельфа и абиссали моря. Однако в силу ряда причин термохалинная структура вод этого района ранее почти не изучалась, а имевшиеся данные не обладали достаточным разрешением по пространству и времени. Это определило необходимость проведения специальных натурных экспериментов по изучению процессов, происходящих во фронтальной зоне. Такие эксперименты были выполнены летом 1984 г. и зимой 1985 г. В состав наблюдений входило: проведение крупномасштабных съемок термохалинных полей района, измерение температуры, солености и компонент скорости течения на полигоне буйковых станций и выполнение фронтальных разрезов с повышенным разрешением по пространству.

Во втором параграфе главы проводится анализ результатов натурных наблюдений, которые помогли выяснить основные особенности

термохалинной структуры и местоположение фронтальных разделов в северо-западной части моря в различные сезоны года. Установлено, что летом основные фронты прослеживаются в поле солености. Градиенты плотности в них более высокие по сравнению с зимними и доходят до $0.1-0.2 \text{ кг/м}^3/\text{км}$. В зимний период основной фронтальный раздел, также как и летний, располагается вдоль кромки шельфа, но выделяется в поле температуры. Средний градиент плотности на зимнем фронте составляет $0.05-0.1 \text{ кг/м}^3/\text{км}$.

По данным вертикального зондирования температуры и солености в зоне фронта в летний период, с помощью эмпирических формул Тернера / Тернер, 1977 /, были определены потоки тепла и солей, переносимые через пикноклин процессами дифференциально-диффузионной конвекции по типу "солевых пальцев". Оценки эффективных коэффициентов переноса тепла и соли, соответствующие этим потокам, дают величины порядка $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, что совпадает с характерными значениями этих коэффициентов для области пикноклина, приводимыми Федоровым / Федоров, 1976 /.

В третьем и четвертом параграфах главы описывается модель фронтальной динамики / Сычев, 1985 / и основные результаты численных экспериментов, проведенных с ее помощью по изучению процессов трансфронтальной циркуляции.

Гидродинамическая модель основана на полной системе уравнений, записанных в приближениях Буссинеска и ζ - плоскости для системы координат, в которой ось OZ направлена вниз, ось OX - во вдольфронтальном направлении, а ось OY - ей перпендикулярно. Уравнения движения для поперечной и вертикальной компонент скорости с помощью операции вихря преобразованы к уравнению переноса горизонтальной составляющей вихря скорости ξ и эллиптичес-

кому уравнению для функции тока - $\nabla^2 \psi = \partial_y W - \partial_z V = \xi$.
На верхней границе, совпадающей со свободной поверхностью, предполагается выполнение условия "твердой крышки" и наличие соответствующих потоков тепла, солей и импульса. На жидких границах задается условие свободного протекания, а вертикальное распределение температуры и солености на боковых границах считается неизменным во времени. Начальные условия задавались в предположении, что к моменту начала расчетов акт фронтогенеза произошел, после чего деформационные поля, которые привели к образованию начального возмущения в поле плотности, прекратили свое действие.

Сформулированная модель была реализована численно. С ее помощью рассчитаны поля стационарной трансфронтальной циркуляции для летнего и зимнего фронтов. Установившаяся циркуляция имеет вид двух ячеек с горизонтальными осями, параллельными фронту. За счет этого в поверхностном слое возникает область интенсивной конвергенции с большими скоростями вертикальных движений порядка 10^{-4} см/с. В стрессе струйного течения, связанного с фронтом, скорости, для случая летнего фронта, достигают 20-30 см/с. В зимний период наблюдается значительная асимметрия в расположении ячеек циркуляции. За счет уменьшения среднего градиента плотности в зоне фронта скорости течения в стрессе струйного потока составляют лишь 10-15 см/с.

С помощью модели были также исследованы процессы релаксации летнего и зимнего фронтов. Полученные решения демонстрируют, что заданные фронтальные возмущения релаксируют, уменьшая угол наклона раздела и интенсивность циркуляции за счет вязкой диссипации кинетической энергии. Градиент плотности на внешней границе раз-

дела при этом возрастает. При задании анизотропии в вертикальном распределении коэффициента турбулентной вязкости удается достичь стационарного состояния фронта.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

I. На основе анализа данных гидрометеорологического режима Черного моря и серии специализированных натурных экспериментов:

- 1). Выделены основные механизмы, определяющие сезонную и синоптическую изменчивость характеристик верхнего слоя двух наиболее крупных районов моря - северо-западной шельфовой части и центральной глубоководной акватории. В первом из указанных районов кроме термических факторов значительное влияние на формирование поля плотности оказывают процессы перестройки халинной структуры и эффекты придонного пограничного слоя. Во втором районе термическая структура формируется процессами локального перемешивания и адвективного перераспределения тепла.
- 2). Установлено, что для воспроизведения основных черт изменчивости термической структуры глубоководной части моря предпочтительнее использовать дифференциальные модели, а для района северо-западной части - двухслойные интегральные модели верхнего слоя.
- 3). Выявлено, что вклад изменений температуры в среднем в 3-5 раз превосходит вклад солености в формирование поля плотности верхнего слоя. Вклад адвективной составляющей в тепловой баланс деятельного слоя составляет примерно 10-20%. Толщина ВКС в центральной части моря в летний период соответствует оценкам толщины экмановского пограничного слоя и изменяется в пределах 5-10 м.
- 4). Установлено, что в летний сезон фронтальные разделы между цен-

гральной и северо-западной частями моря прослеживаются в поле солености и более обострены по сравнению с зимними. Средний градиент плотности в зоне летнего фронта составляет около $0.5 \text{ кг/м}^3/\text{км}$, что в 2-4 раза превышает градиент плотности в зоне фронта в зимний период. Основной зимний фронт, также как и летний, располагается примерно вдоль кромки шельфа северо-западной части моря, но прослеживается в поле температуры.

- 5). Показано, что за счет размывания тонкоструктурных элементов процессами двойной диффузии возникают потоки тепла и солей через сезонный пикноклин, и соответствующие этим потокам оценки эффективных коэффициентов обмена теплом и солью составляют примерно $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

II. Проведенный анализ гидрометеорологического режима моря позволил построить и верифицировать:

- 1). Численную нестационарную модель деятельного слоя глубоководной части моря, описывающую процессы локального перемешивания и адвективного переноса тепла.
- 2). Численную гидродинамическую модель фронтальной динамики, основанную на уравнениях в "примитивном" виде.

III. Численные эксперименты с разработанными моделями показали, что:

- 1). Без учета адвекции тепла модель верхнего слоя позволяет с необходимой для практики точностью рассчитывать межмесячные климатические изменения температуры ВКС в центральных районах глубоководной части моря. В прибрежных районах ошибки расчетов превышают допустимые значения и обусловлены влиянием адвекции тепла течениями.
- 2). Ошибки расчетов толщины ВКС в период с апреля по ноябрь не превышают 2-10 м и находятся в пределах точности инструментального

определения нижней границы ВКС. В период максимального развития зимней конвекции (январь-март) модель дает более значительные ошибки - до 20-30 м.

- 3). При проведении расчетов межмесячных изменений температуры ВКС по климатическим данным дрейфовый перенос тепла можно не учитывать, так как это не уменьшает ошибок расчетов по сравнению с результатами, полученными по одномерной модели.
- 4). Расчет переноса тепла суммарными квазигеострофическими течениями позволяет уменьшить среднюю по акватории ошибку расчетов температуры примерно на 0.1°C , однако в прибрежных областях ошибки расчетов остаются существенными. Поэтому для более точного определения адвективного потока тепла в указанных районах необходимо проводить расчет трехмерной циркуляции по более сложным, чем квазигеострофическая, моделям, основанным на принципах четырехмерного анализа.
- 5). В переходные сезоны, особенно осенью, вклад потока солей возрастает до 60-100% и определяет момент перехода к процессу конвективного заглубления ВКС.
- 6). При расчетах синоптической изменчивости характеристик верхнего слоя на период до 5 суток модель хорошо воспроизводит короткопериодные изменения температуры и толщины ВКС. При расчетах на более продолжительный период необходимо учитывать адвекцию тепла течениями.
- 7). Установившееся поле течений трансфронтальной циркуляции на шельфовом фронте имеет вид двух ячеек с горизонтальными осями, параллельными фронтальному разделу. Наличие циркуляционных ячеек приводит к интенсивной конвергенции вод в поверхностном слое, что в свою очередь обуславливает возникновение нисходя-

щих движений со скоростями 10^{-4} - 10^{-3} см/с. Скорости в струйном потоке, связанного с фронтом, составляют по расчетам 20-30 см/с летом, и 10-15 см/с зимой.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных статьях:

1. Батов В.И., Привальский В.Е., Соколов С.Ю. Восстановление пропусков во временных рядах океанологических наблюдений.// Тезисы докл. II Всесоюзной конф. "Перспективные методы планирования и анализа при исследованиях случайных полей и процессов" - М.: МЭИ, 1985, - С.126-129.

2. Батов В.И., Сычев Ю.Ф. Изучение сезонной изменчивости термогидродинамической структуры шельфового фронта северо-западной части Черного моря.// Рук. деп, ВНИИГМИ-МЦД, 1986, 42с., № 510гм.

3. Батов В.И. К вопросу о расчете краткосрочной изменчивости термической структуры деятельного слоя Черного моря.// Рук. деп. ВНИИГМИ-МЦД, 1986, 26с., № 509гм.

4. Батов В.И. Об учете адвективной составляющей в моделях сезонной эволюции поля температуры Черного моря.// Тезисы докл. III Всесоюзной конференции по проблемам промыслового прогнозирования (долгосрочные аспекты). - Мурманск: ПИНРО, 1986, С.129-131.

5. Батов В.И., Соколов С.Ю., Сычев Ю.Ф. Особенности проведения натурного эксперимента при исследовании шельфовых фронтов бесприливных морей.// Труды ГОИН, 1986, вып.185 (в печати).

6. Батов В.И. Дифференциальная модель сезонной эволюции плотностной структуры деятельного слоя Черного моря.// Труды ГОИН, 1986, вып.178 (в печати).

