

ОРДЕНА ЛЕНИНА АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

Мурманский филиал

На правах рукописи

ЛЕБЕДЕВ Игорь Александрович

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЕЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ  
(В СВЯЗИ С ЗАДАЧЕЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ)

II.00.08 - океанология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Мурманск 1991

Работа выполнена в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук Г.В. Алексеев

Официальные оппоненты - доктор географических наук Ю.В. Суставов  
- кандидат географических наук В.К. Павлов

Ведущая организация: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР

Защита состоится "26" марта 1992 г. в 15 час. 00 мин. на заседании специализированного совета Д.024.04.01 по присуждению ученой степени кандидата наук при Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте по адресу: 199226, Санкт-Петербург, ул.Берин

Отзывы в два экземпляра направлять по указанию  
С диссертацией  
Автореферат

Ученый секретарь  
научно-исследовательского  
института географических наук

нап-

ин

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При совершенствовании системы гидрометеорологического обслуживания морских хозяйственных организаций важной задачей является разработка автоматизированных методов расчета и графического представления полей температуры воды на различных горизонтах, а также их прогноза на срок от суток до месяца, т.е. в синоптическом диапазоне изменчивости. В Баренцевом море актуальность исследования и моделирования синоптических процессов повышается в связи со значительной циклонической активностью в атмосфере и высокой повторяемостью штормов. В результате их стохастического воздействия могут формироваться крупные и устойчивые во времени аномалии температуры воды (Нестеров, 1981, 1984; Питербург, 1989 и др.), что необходимо учитывать и при изучении явлений сезонного и климатического масштабов. Вместе с тем до недавнего времени эти особенности не принимались во внимание. На Баренцевом море приоритет отдавался исследованиям многолетней и сезонной изменчивости температуры воды по наблюдениям на вековых и стандартных разрезах. На этой основе разрабатывались методы прогнозов средней температуры по слоям  $0 \div 50$  м,  $0 \div 200$  м для отдельных участков квазипостоянных теплых течений с заблаговременностью от месяца до нескольких лет (Каракаш, 1957; Дрогайцев, 1959; Боровая, 1972, 1977; Суставов, 1977; Бочков, 1977 и др.).

Наиболее крупные разработки автоматизированных методов объективного анализа и краткосрочного прогноза температуры воды на океанских акваториях выполнены в Центре численной океанографии ВМФ США (Clancy, Pollak, 1983) и в Гидрометцентре СССР (Калацкий, Нестеров, 1980; Нестеров, 1988; Зеленко, Реснянский, 1987). Опыт этих исследований показал, что среди первоочередных направлений развития подобных систем наибольшее значение имеют совершенствование методов объективного анализа исходных полей температуры и моделей деятельного слоя, использование циклических схем "анализ-прогноз-анализ". В то же время в локальных морских районах успех прикладного моделирования в большой степени может определяться ориентацией моделей на реальные потоки натуральных данных и учет специфических особенностей масштабов и механизмов изменчивости.



В целом, для создания эффективных информационно-вычислительных систем необходимо применение системного подхода (Нелепо, Тимченко, 1978; Тимченко, 1988). При этом к первоочередным направлениям работ следует также отнести рационализацию и автоматизацию системы сбора океанографической информации, создание современных информационных баз данных, исследование преобладающих масштабов изменчивости полей и влияющих факторов непосредственно в обслуживаемом районе, тщательную адаптацию моделей к объекту.

Цель и задачи диссертации. Целью работы является исследование региональных особенностей пространственно-временной изменчивости температуры воды для их учета при создании информационно-вычислительной системы, включающей методы оперативного анализа и прогноза термических полей Баренцева моря. Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики объективного анализа океанографических полей, учитывающей специфические особенности моря.
2. Оптимизация региональной системы океанографических наблюдений.
3. Создание специализированной информационной базы, проведение экспериментальных работ для изучения синоптической и мезомасштабной изменчивости.
4. Статистический анализ натуральных данных для определения характерных масштабов изменчивости, пределов точности прогнозирования полей температуры воды.
5. Исследование с помощью локальной модели роли основных факторов, определяющих синоптическую эволюцию вертикальной термической структуры.
6. Поэтапное внедрение и испытания разрабатываемых блоков комплексной информационно-вычислительной системы.

Научная новизна. Впервые для различных сезонов, районов, слоев Баренцева моря получены статистические характеристики полей температуры воды: пространственные автокорреляционные функции в различных направлениях, временные структурные функции, оценки составляющих дисперсии за счет синоптических и мезомасштабных процессов. Выявлены преобладающие масштабы неоднородностей полей температуры воды и параметров ее вертикального распределения.

Разработаны общая структура реализованного в соавторстве (Голубев, Зуев, Лебедев, 1989, 1991) программного комплекса объек-

тивного анализа океанографических параметров и ряд использованных в нем алгоритмов. Предложен метод восстановления океанографических полей с учетом положения крупномасштабной фронтальной зоны. Обоснована адекватная региональным условиям методика разделения полей на разномасштабные составляющие изменчивости.

Выполнена оптимизация системы океанографических наблюдений. Проект новой сети станций обеспечивает восстановление полей температуры воды по материалам крупномасштабных съемок моря с заданной точностью, позволяет реализовать мониторинг климатической и сезонной изменчивости и сбор информации о синоптических и мезомасштабных процессах в характерных районах.

На основе специализированных экспериментов впервые оценены параметры локальных фронтов и мезомасштабных образований в однородных зонах Баренцева моря, получены необходимые для автоматизированного анализа полей обобщенные характеристики климатической полярной фронтальной зоны (ПФЗ) на различных ее участках. Проанализированы условия локальной интенсификации передачи тепла от глубинных атлантических вод к поверхности на севере моря.

Построена и верифицирована одномерная модель синоптической эволюции вертикальной термической структуры вод. Показана возможность ее использования в прогностических целях при условии учета адвекции тепла за счет дрейфовых течений.

По результатам исследований пространственно-временной изменчивости температуры воды конкретизирована концепция экономической региональной системы методов оперативного анализа и прогноза термических полей.

Практическая ценность работы. Проект оптимизированной системы судовых океанографических наблюдений с 1986 года внедрен в Мурманском управлении по гидрометеорологии, отдельные элементы системы используются в экспедиционной практике региональных организаций различных ведомств.

Комплекс методов объективного анализа полей может применяться при решении широкого круга задач, связанных с прикладным математическим моделированием океанографических процессов и оперативным гидрометеорологическим обслуживанием хозяйственных организаций. В частности, с 1990 года в Мурманскгидромете используется автоматизированный метод оперативного анализа и инерционного (с учетом годового хода) прогноза полей температуры воды.

Ряд полученных автором результатов включен в научно-справочное пособие по гидрометеорологическому режиму Баренцева моря, подготовленное в рамках проекта "Моря СССР".

На защиту выносятся:

1. Адаптированная к региональным особенностям методика объективного анализа полей температуры воды.
2. Обобщенные статистические характеристики синоптической и мезомасштабной изменчивости полей температуры воды и параметров вертикальной термической структуры Баренцева моря.
3. Оптимизированная система судовых океанографических наблюдений.
4. Данные о параметрах климатических и локальных фронтов в регионе, полученные из анализа материалов специализированных экспериментов.
5. Сценки интенсивности теплообмена глубинных атлантических вод с поверхностными слоями в северной части моря и условий локальной активизации этого процесса.
6. Верифицированная для различных районов моря одномерная модель перераспределения тепла в синоптических масштабах времени.
7. Принципиальная схема построения экономической системы оперативного анализа и прогноза полей температуры, учитывающая особенности режима Баренцева моря и реальные потоки натуральных данных.
8. Результаты опытного применения метода инерционного прогноза полей температуры с учетом ее годового хода.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на семинарах лаборатории океанографии МФ ААНИИ и итоговых сессиях Ученого совета МФ ААНИИ (1985-1991), Всесоюзной конференции "Экология и биологическая продуктивность Баренцева моря" (Мурманск, 1986), заседаниях Межведомственного океанографического семинара при Мурманском отделе Географического общества СССР (Мурманск, 1986-1988), III съезде советских океанологов (Ленинград, 1987), итоговой сессии Ученого совета ААНИИ (Ленинград, 1988), Всесоюзном семинаре "Океанологические фронты северных морей: характеристики, методы исследований, модели" (Москва, 1989), VIII Всесоюзной конференции по промышленной океанологии (Ленинград, 1990), семинарах отдела морских прогнозов ГИЦ СССР (1990) и отдела теории взаимодействия океана и атмосферы ААНИИ (1991), IV Всесоюзной

конференции "Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов" (Петрозаводск, 1991).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (200 наименований). Общий объем работы - 207 страниц, включая 138 страниц машинописного текста, 7 таблиц, 46 рисунков.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель и ставятся задачи исследования.

Первая глава является обзорной. В первом параграфе описываются основные климатические закономерности формирования полей температуры воды Баренцева моря, которые необходимо учитывать при исследовании изменчивости меньших масштабов. К ним относятся ярко выраженный годовой ход температуры, повсеместное формирование в летний период верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), интенсивная осенне-зимняя конвекция, разделение моря крупномасштабной ПФЗ на две части с различным режимом, существенная роль адвекции тепла из Норвежского моря в формировании термических полей южной, незамерзающей части моря и т.д.

Несмотря на длительную историю изучения Баренцева моря, обобщение сведений о синоптической и мезомасштабной изменчивости полей до сих пор не проводилось. Для изучения временной изменчивости в указанных диапазонах отчасти могут использоваться данные наблюдений на многосуточных станциях, выполнявшихся эпизодически в 1961-1990 годах. В основном накопленные архивы данных недостаточны для решения всех поставленных в работе задач, в связи с чем требуется проведение дополнительных экспериментов на основе модернизированной системы наблюдений.

Во втором параграфе представлен аналитический обзор литературы, посвященной научно-методическим принципам экспериментальных исследований разномасштабной изменчивости океанографических полей и выбора оптимальной дискретности сетей станций. На этой основе и с учетом исторически сложившейся в регионе системы наблюдений выбирается подход к ее оптимизации.

Вторая глава посвящена развитию методов обработки натуральных данных и обоснованию проекта оптимизированной системы наблюдений. В первом параграфе описывается использованный в работе комплекс

методов объективного анализа и статистической обработки данных судовых океанографических съемок (Голубев, Зуев, Лебедев, 1989, 1991), реализованный на ЕС ЭВМ. Включенные в комплекс сервисные программы предназначены для выборки данных из специализированной информационной базы, корректировки и объединения выборок. Программы классификации осуществляют определение координат (т.е. температуры и глубины) границ квазиоднородных и высокоградиентных слоев по профилям вертикального распределения температуры, а также разделение совокупности данных океанографических съемок на фронтальную и однородные зоны. Интерполяция в узлы заданной регулярной сетки производится с одновременной оценкой вероятных ошибок восстановления поля. Влияющие точки выбираются по условию минимума среднеквадратической ошибки восстановления, при этом возможен учет анизотропности поля путем задания параметров обобщенных эллипсов корреляции. Вычитанием норм температуры воды на момент наблюдений обеспечивается вычисление полей аномалий. При предположении о сохранении аномалии в течение анализируемого периода осуществляется приведение исходного поля к заданной дате. Комплекс также предусматривает пространственное сглаживание или фильтрацию данных в узлах регулярной сетки, восстановление обработанного поля в исходных точках и расчет пространственных статистических характеристик по градиентам направления и расстояния.

Особенностью комплекса является запись всех промежуточных результатов в рабочий набор данных в виде последовательных наборов жесткой структуры, к которым может обращаться любая другая программа. Это обеспечивает возможность выбора оптимальной методики и последовательности расчетов в целях выделения случайных составляющих изменчивости для их статистического исследования, при решении различных оперативно-прогностических задач или при разработке математических моделей.

Во втором параграфе рассматриваются методика и результаты оптимизации океанографических наблюдений. Поскольку решение оптимизационной задачи не может быть полностью универсальным, принципиальное значение при формулировке проблемы приобретает определение наиболее важных требований к системе, а вся дальнейшая работа должна быть подчинена поиску разумного компромисса. В данном случае считалось, что оптимизированная система в первую очередь должна обеспечивать: а) восстановление океанографических полей

по результатам судовых съемок с сохранением по всей акватории заданной точности; б) продолжение уникальных многолетних рядов наблюдений на вековых и основных стандартных разрезах; в) регулярный сбор данных для действующих методик морских прогнозов; г) мониторинг климатической и сезонной изменчивости в отдельных репрезентативных районах; д) сбор информации для исследований синоптических и мезомасштабных процессов. Кроме того система должна быть практически осуществимой с учетом региональных экспедиционных ресурсов.

При таком сочетании требований для построения статистически обусловленной сети наиболее целесообразно применение подхода, разработанного ранее в метеорологии (Дроздов, Шепелевский, 1946; Гандин, 1961 и др.). В систему были включены, в первую очередь, вековые и основные стандартные разрезы, далее проводились эксперименты по объективному анализу полей с вычислением вероятных ошибок восстановления. В районах, где ошибки превышали допустимые, добавлялись дополнительные станции. Было признано возможным также исключение некоторых стандартных станций южной части моря при выполнении крупномасштабных съемок. В качестве критерия точности восстановления в поверхностных слоях выбраны значения  $0,3^{\circ} \div 0,4^{\circ}\text{C}$ , определенные по результатам опроса потребителей океанографической информации и приблизительно соответствующие величинам  $0,674b_i$ , где  $b_i$  — характерные среднеквадратические отклонения температуры воды в однородных зонах в разные сезоны. В связи с тем, что температура является наиболее изменчивым из традиционно наблюдаемых на разовых станциях гидролого-гидрохимических элементов, причем ниже сезонного термоклина ее пространственная изменчивость убывает, полагалось, что построенная таким образом сеть будет заведомо достаточной для восстановления полей других элементов на основных стандартных горизонтах. Полученная в результате генеральная сеть включает 285 станций, работы на которых целесообразно проводить дважды в год в периоды максимального и минимального прогрева. Для обеспечения квазисинхронности съемок в них должны участвовать 2 судна в зимний период и 4 судна — в летний.

Из числа станций генеральной сети выделено II реперных точек в наиболее репрезентативных районах. Они предназначены для выполнения в переходные сезоны одно-трехсуточных серий наблюдений

(наряду с минимумом вековых и стандартных разрезов). Это обеспечивает повышение точности определения аномалий температуры воды, исследование межгодовой и сезонной изменчивости.

Для изучения синоптических и мезомасштабных особенностей предложено периодически проводить многосуточные наблюдения в реперных точках с одновременным выполнением мезо- и микросъемок в их окрестности, а также полигонные работы в характерных районах ПФЗ (западный, центральный, восточный и северный полигоны). Для повышения эффективности таких экспериментов разработаны методические рекомендации, в которых рассматриваются комплексы наблюдений, требования к их дискретности, схемы съемок различных масштабов и т.д.

В третьей главе приводятся результаты анализа пространственно-временной изменчивости температуры воды по натурным данным.

С помощью численных экспериментов обоснована методика объективного анализа и статистической обработки данных океанографических съемок, учитывающая региональные особенности исследуемого бассейна. На первом этапе осуществляется разделение исходной совокупности данных на фронтальную, теплую и холодную зоны. Затем они попарно объединяются в два массива: теплые + фронтальные и холодные + фронтальные, после чего выполняется объективный анализ отдельно по каждой из двух совокупностей с последующим объединением в общее поле. В переходной зоне предпочтение при этом отдается тому результату интерполяции, который дает наименьшую среднеквадратическую ошибку. Таким образом исключается одновременное участие точек, принадлежащих теплым и холодным водам, в вычислении значения в одном и том же узле. Ближайшие точки фронтальной и однородной зон учитываются при интерполяции в окрестности их границы. Сравнение с результатами синоптического (ручного) анализа и других объективных методов подтвердило, что такой алгоритм позволяет восстанавливать довольно мелкие детали полей на участках со сложной структурой и предотвращает "размывание" фронтов, характерное для традиционных методов анализа.

Для выделения случайных составляющих из исходных полей температуры вычитались поля ее среднемноголетних значений на заданную дату. Оценки статистических характеристик изменчивости и вкладов в общую дисперсию составляющих различных масштабов производились на основе фильтрации полученных полей аномалий с шириной

окна от 50 до 200 км.

Статистический анализ пространственной изменчивости температуры воды на стандартных горизонтах и параметров вертикальной термической структуры (глубины ВКС, глубины залегания нижней границы и толщины слоя скачка, среднего градиента температуры в слое скачка) был выполнен по данным четырех крупномасштабных междомственных экспедиций "Барекс". Экспедиции проводились с учетом рекомендаций по модернизации системы наблюдений в 1984-1987 годах (в периоды максимального и минимального прогрева вод). По согласованным программам в них участвовало от 8 до 12 судов различных ведомств, что обеспечивало выполнение в течение  $30 \pm 50$  суток двух-трехкратных съемок моря, сопровождавшихся полигонными и многосуточными наблюдениями в отдельных районах. Общий объем гидрологических наблюдений составил около 1000 станций при зимних съемках и около 2000 - при летних.

В ходе расчетов оценивались пространственные автокорреляционные и структурные функции по различным направлениям, дисперсии процессов различных масштабов. Обобщение этих оценок показало, что наибольший вклад в дисперсию поля аномалий температуры вносят неоднородности с масштабами  $200 \pm 350$  км. Вклад в общую дисперсию мезомасштабных процессов и ошибок наблюдений в пределах однородных зон незначителен и составляет от 5-8% в поверхностных слоях до 20-30% в слое скачка. Получены достаточно надежные эллипсы корреляции для различных ее уровней, характерные для различных сезонов, районов, слоев моря. Величины больших полуосей эллипсов корреляции полей отклонений от норм (для уровня 0,1) изменяются от 150 км до 380 км, а соотношения большой и малой осей - от 1,2/1 до 2,2/1. Исследовано вертикальное распределение интервалов корреляции, для южной части моря характерным является наличие минимума этих величин в слоях, подстилающих слой скачка (т.е. 50-100 м). Структура полей глубины ВКС оказалась близкой к структуре полей температуры на стандартных горизонтах, а интервалы корреляции полей глубины нижней границы слоя скачка в южной части моря уменьшаются до  $90 \pm 120$  км. В северных районах эта особенность не наблюдается, кроме того, здесь практически отсутствует анизотропность полей характеристик вертикального распределения температуры.

Полученные по материалам крупномасштабных съемок выводы о

преобладающих масштабах изменчивости и характерных интервалах корреляции были подтверждены в результате статистической обработки данных непрерывной регистрации температуры поверхностного слоя воды на 17-ти длительных галсах в различных рейсах НИС "Профессор Молчанов" (протяженность галсов изменялась от 280 до 600 км, дискретность отсчетов при формировании рядов - от 0,4 до 1,2 км). При этом были также выявлены преобладающие пространственные масштабы мезомасштабных неоднородностей - 25 ÷ 30 км и 6-10 км. Вклад этих составляющих в общую дисперсию изменялся от 5-10% до 40-50% в зависимости от выраженности синоптических неоднородностей.

Для анализа временной изменчивости использовались материалы наблюдений на 64 многосуточных станциях продолжительностью от 6 до 41 суток, выполненных в 1961-1990 годах. Здесь основное внимание уделялось получению типовых структурных функций, необходимых для оценки при объективном анализе вероятных ошибок за счет несинхронности наблюдений по методике В.Ф.Суховой (1969, 1971). Типизация проводилась путем осреднения семейств структурных функций для основных гидрологических сезонов с отфильтрованной мезомасштабной изменчивостью. Выделено 9 типов: для периода прогрева (конец мая-июль) и лета (конец июля-сентябрь) - по три типа, отражающих изменчивость в различных слоях; для периода выхолаживания (октябрь-декабрь) - два; для зимы (январь - первая половина мая) - один. В шести из этих девяти случаев структурные функции достигают насыщающего уровня через 30-60 часов и в дальнейшем практически не меняются, различия состоят только в средних значениях этого уровня, колеблющихся в пределах от 0,3° до 0,6°C. Типовые структурные функции, полученные по данным многосуточных наблюдений в поверхностных слоях в сезоны интенсивного изменения теплосодержания вод, монотонно возрастают. Они достигают за 10 суток значений ~ 1,4°C в период прогрева и ~ 1,0° в период выхолаживания, что указывает на заметное увеличение в эти сезоны вероятных ошибок восстановления полей за счет несинхронности измерений. Летом в сезонном термоклине рост структурных функций прекращается в среднем через 50-70 часов, но на довольно высоком уровне (~ 1,3° ÷ 1,4°C). В дальнейшем их ходе наблюдается минимум, обусловленный сильной синоптической изменчивостью с масштабами 100 ÷ 120 ч.

В двух последних параграфах третьей главы приводятся результаты качественного анализа данных специализированных полигонных и многосуточных наблюдений, выполненных в последние годы с использованием разработанных автором методических рекомендаций и, в ряде случаев, при его непосредственном участии. Анализ материалов 26 экспериментов в характерных районах ПФЗ позволил определить типичные значения суммарных перепадов (~ 1±5°C) и градиентов (~ 0,05 ÷ 2,2°C/км) температуры, используемые в дальнейшем при автоматизированном комплексном анализе полей. Показано, что в целом положение климатических фронтов в пространстве довольно устойчиво: в районах, где они приурочены к наиболее резким перепадам глубин, амплитуды их синоптических смещений не превышают 60 км, а в центральной части моря иногда достигают 200 км. Выделены участки наиболее интенсивного меандрирования и образования вихрей (в том числе - внутритермоклинных), связанные с зонами опускания атлантических вод под баренцевоморские и с зоной наибольшей бароклинности фронта в центральной части моря. По данным одного из экспериментов в этом районе оценены параметры волнового фронтального процесса ( $\lambda \approx 50-60$  км,  $T \approx 32-40$  ч;  $C \approx 0,4-0,5$  м/с). Большая повторяемость колебаний с такими периодами подтверждена при статистической обработке рядов наблюдений на многосуточных станциях, выполненных в различные годы вблизи ПФЗ.

Анализ материалов четырех экспериментов в окрестности различных реперных точек показал, что важной причиной мезомасштабных колебаний в однородных зонах является формирование в них локальных фронтов с перепадами температуры до 0,4°-0,5°C, сосредоточенными на расстояниях порядка 1 км, а также перемещение, меандрирование этих фронтов, образование вихрей с масштабами 6-10 км.

Четвертая глава посвящена исследованиям реакции вертикальной термической структуры на атмосферные синоптические воздействия на основе численного моделирования.

В качестве прототипа использовалась одномерная интегральная модель Ю.М.Куфтаркова и В.К.Коснырева (1976). Параметризация продукции и диссипации турбулентной энергии в ВКС осуществлялась по соотношению, предложенному Ю.Д.Реснянским (1975, 1976). В модель внесены некоторые уточнения. В частности, для проведения числен-

ных экспериментов предусмотрено табличное задание переменного коэффициента вертикальной турбулентной теплопроводности в сезонном термоклине:  $K(z)$ , а также горизонтальной адвекции тепла:  $A_h(t)$  – в пределах ВКС;  $A(z, t)$  – в термоклине. Для предотвращения аномального прогрева поверхности моря в штилевых условиях введен дополнительный параметр – минимально возможная скорость ветра  $V_{min}$  (принимается  $V = V_{min}$  в случае  $V < V_{min}$ ). Это отражает близкое к реальности предположение о сохранении некоторого уровня турбулизованности верхнего слоя даже при штиле. При отрицательных потоках тепла из атмосферы и исчезновении разрыва температуры под ВКС применяется механизм конвективного приспособления. Численная реализация модели выполнена В.А.Голубевым.

Модель верифицирована автором по данным нескольких многосуточных станций в северной и южной части моря. Результаты численных экспериментов показали, что с учетом некоторых различий параметров для севера и юга модель хорошо отражает влияние как штормовых воздействий, так и интенсивного прогрева поверхностного слоя. Обеспеченность расчетов температуры воды в ВКС и сезонном термоклине в течение нескольких суток составляет 80–85% при допустимых ошибках 0,2–0,3°C, а глубины ВКС – 70–80% при допустимых ошибках 5–7 м. Расчеты по данным многосуточных станций, выполненных в одной и той же точке, но в разных синоптических ситуациях, показали, что степень влияния горизонтальной адвекции тепла в этих временных масштабах колеблется в широких пределах и определяется направлением и интенсивностью дрейфовых течений.

При построении системы прогнозирования полей температуры воды в масштабах моря необходимо учитывать специфические особенности перераспределения тепла в его северной части, связанные с распространением здесь относительно теплого глубинного слоя атлантических вод и его теплообменом с поверхностными слоями. Результаты качественного анализа и численных оценок интенсивности этих процессов рассмотрены в третьем параграфе четвертой главы. Использовались материалы двух съемок северо-запада моря, выполненных с интервалом около месяца летом 1989 года (в рамках Советско-норвежского океанографического проекта). Наблюдения гидрологическими зондами высокого разрешения показали, что холодный экранирующий слой, препятствующий поступлению тепла глубинных вод к поверхности, был разрушен на небольших участках акватории,

приуроченных к некоторым прибрежным и фронтальным районам. В первом случае это происходило вследствие благоприятного сочетания условий для изопикнического подъема атлантических вод и обрушения полусуточных внутренних волн при подходе к берегу, во втором – вследствие активных интрузионных процессов, сопровождающихся вертикальным теплообменом за счет совместного действия послойной конвекции и солевых пальцев в верхних и нижних частях интрузий. На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности (при условиях постоянного адвективного притока тепла в глубинных слоях и оттока тепла на ледотаяние – в поверхностных) были оценены по натурным данным эффективные коэффициенты теплообмена, потоки тепла и скорость ледотаяния. В частности, в прифронтальных районах интрузионного расслоения потоки достигали ориентировочно  $25 \pm 58$  Вт/м<sup>2</sup>, а лед толщиной 10 см должен таять за счет этих процессов в течение 6–17 суток. Анализ спутниковых ледовых карт за несколько лет показал, что на выделенных локальных участках акватории систематически образуются полыньи. В некоторые годы это приводит к более раннему освобождению ото льда северной части моря по сравнению с центральной.

В пятой главе рассматриваются прикладные аспекты использования результатов проведенных исследований при разработке методов расчетов и прогнозов.

Аномалии температуры воды в Баренцевом море сохраняются, в среднем, в течение 3–6 месяцев. Поэтому для прогнозирования полей температуры в пределах месяца в большинстве случаев правомерно применение инерционного метода, основанного на переносе аномалий по годовому ходу вперед на заданную дату. При этом оперативный объективный анализ исходного поля осуществляется с учетом полученных в данной работе типовых характеристик полей, выбираемых автоматически в зависимости от сезона, района и горизонта наблюдений.

Опытные прогнозы на середину следующего за исходным месяца выполнялись в период с августа по декабрь 1990 года для трех горизонтов (0 м, 50 м, придонный). Их оправдываемость в 9 из 12 случаев оставалась в пределах от 83 до 94%, а в остальных – была снижена до  $71 \pm 75\%$ . Эффективность метода по сравнению с климатическими и обычными инерционными прогнозами колебалась от 8 до 58%. Качественный анализ показал, что уменьшение оправдываемости



мости было связано с аномальным прогревом поверхностных слоев на севере моря в сентябре и с интенсивным вертикальным перераспределением тепла под влиянием штормов - в октябре. Оба эти процесса в значительной степени могут быть учтены при привлечении предложенной одномерной математической модели.

С учетом специфических особенностей режима моря сформулирована концепция развития экономичной информационно-вычислительной системы оперативного анализа и прогноза полей температуры воды. Она должна сочетать объективный анализ, инерционный прогноз аномалий, учет годового хода температуры, расчет и прогноз на несколько суток эволюции термической структуры с помощью модели. В данной работе подтверждена однородность теплой и холодной зон, показаны значительные масштабы преобладающих элементов структуры полей аномалии температуры, относительно малый вклад в дисперсию мезомасштабных образований, устойчивость положения климатических фронтов и т.д. Ранее были выявлены особенности циркуляции в море: преимущественно ветровое ее происхождение, однонаправленность неперiodических течений в верхнем 200-метровом слое, малость вертикальных скоростей (Танцюра, 1959; Денисов, 1985). В связи с этим представляется допустимым:

- заменять на первом этапе прогноз положения ПФЗ диагнозом;
- применять модель эволюции термической структуры только в нескольких характерных точках (центрах областей аномалий) с последующей интерполяцией результатов в пределах однородных зон;
- учитывать адвекцию на основе расчета только дрейфовых течений.

Для обеспечения системы исходными данными следует использовать предложенную оптимальную схему наблюдений и производить усвоение другой текущей гидрологической информации. Наибольшее внимание при усвоении должно быть уделено возможно более частому уточнению положения ПФЗ по попутным и специализированным судовым и авиационным наблюдениям.

Проведенные исследования позволяют предположить, что в случае тщательной адаптации методов к конкретным районам возможно уменьшение точности прогнозирования по предлагаемой схеме (в сравнении с полными моделями) будет оставаться в пределах максимально достижимой точности восстановления полей температуры по натурным данным.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработаны структура и ряд алгоритмов комплекса методов объективного анализа и статистической обработки результатов океанографических наблюдений. Обоснована методика учета климатической фронтальной зоны при объективном анализе полей. Показано, что для Баренцева моря наиболее адекватным методом разделения детерминированных и случайных составляющих изменчивости является исключение из исходных данных океанографических съемок полей среднегодовой температуры воды с учетом ее годового хода.

2. На основе статистической обработки большого объема натуральных данных получены оценки характерных для различных сезонов, районов и слоев моря пространственных автокорреляционных и временных структурных функций, что позволяет применять предложенный метод объективного анализа при математическом моделировании и разработке прогностических методик.

3. Показано, что в Баренцевом море преобладающими в синоптическом диапазоне изменчивости являются аномалии с пространственными масштабами 200-350 км, характерными для баротропных процессов. Выявлена анизотропность полей аномалий: ориентация максимальных интервалов корреляции, как правило, хорошо согласуется с направлениями основных струй квазипостоянных течений. В мезомасштабном диапазоне доминируют неоднородности с масштабами 25-30 км и 6-10 км. На участках пространства и отрезках времени, соответствующих преобладающим синоптическим масштабам, вклад этих составляющих в общую дисперсию изменяется от 5-10% до 40-50% в зависимости от выраженности синоптических неоднородностей. Надежное исключение такой изменчивости без искажения синоптической структуры поля достигается сглаживанием данных океанографических съемок с шириной окна около 50 км и является наиболее необходимым при анализе данных на горизонтах, близких к высокоградиентным слоям.

4. Разработанный с учетом статистических оценок изменчивости и наличия реальных экспедиционных ресурсов проект оптимизации региональной системы океанографических наблюдений обеспечивает:

- восстановление полей температуры воды по результатам крупномасштабных съемок с приемлемой для практики точностью;
- сбор данных для информационно-вычислительной системы методов

расчета и прогноза термических полей;

- мониторинг климатической и сезонной изменчивости;
- исследования синоптических и мезомасштабных процессов в характерных районах моря.

5. В результате обобщения материалов специализированных судовых экспериментов дана качественная характеристика структуры различных участков ПСЗ, выявлены районы наиболее интенсивного меандрирования и вихреобразования, оценены преобладающие масштабы вихрей (~ 25 ÷ 50 км). Определены типичные значения градиентов и суммарных перепадов температуры на климатических фронтах, используемые при автоматизированном комплексном анализе полей. Показано, что одной из важных причин мезомасштабной изменчивости полей температуры в однородных зонах является наличие локальных фронтальных разделов с перепадами температуры 0,4°–0,5°С, сосредоточенными на расстояниях порядка 1 км, а также их меандрирование и образование вихрей с размерами 6 ÷ 10 км.

6. Получены по экспериментальным данным предварительные оценки потоков тепла от глубинных атлантических вод к поверхности на локальных участках акватории северной части моря. Благоприятные условия для активизации этих процессов за счет обрушения полусуточных внутренних волн при подходе к берегу или развития двойной диффузии в зонах интенсивного интрузионного расслоения создаются в некоторых прибрежных и фронтальных районах.

7. Сформулирована и верифицирована для южной и северной частей моря достаточно простая, но учитывающая основные региональные особенности одномерная модель вертикального перераспределения тепла в синоптических масштабах времени. Показано, что модель хорошо отражает влияние как штормовых воздействий, так и интенсивного прогрева поверхностного слоя, и может использоваться в прогностических целях при условии учета адвекции тепла дрейфовыми течениями.

8. Справдываемость предложенного метода инерционного прогноза полей температуры воды на месяц с учетом ее годового хода составляла в августе–декабре 1990 года от 71 % до 94%. Эффективность метода по сравнению с климатическими и обычными инерционными прогнозами колебалась от 8 до 58%, максимальная эффективность (~ 50 ÷ 58%) наблюдалась в периоды наиболее выраженной аномальности тепловых процессов. Анализ случаев пониженной оп-

равдываемости показал, что ошибки прогнозов могут быть существенно уменьшены при использовании для их корректировки локальной модели перераспределения тепла по вертикали и расчетов дрейфовой адвекции.

9. Показана возможность повышения экономичности региональной информационно-вычислительной системы оперативного анализа и прогноза полей температуры воды без существенных потерь точности за счет введения ряда упрощений. Система должна опираться на оптимальную схему сбора океанографических данных, сочетать тщательный объективный анализ, инерционный прогноз и учет годового хода температуры с корректирующими расчетами и прогнозами на несколько суток эволюции термической структуры в характерных районах с помощью математической модели.

По теме диссертации опубликована 21 работа (в соавторстве). В этих публикациях вклад автора заключается в непосредственном участии в обосновании методик и проведении экспериментальных работ, в создании методов обработки натуральных данных, в выполнении численных экспериментов и обобщении результатов. В наибольшей степени содержание диссертации и основные научные выводы отражены в следующих работах:

1. Голубев В.А., Лебедев И.А. Об осреднении вертикальных профилей температуры воды в деятельном слое моря методом опорных точек. // Труды ААНИИ. - 1983. - т.385, - с.68-74.
2. Аверинцев В.Г., Денисов В.В., Зуев А.Н., Лебедев И.А., Петров В.С. К проблеме комплексного исследования и моделирования экосистем Баренцева моря. // В кн.: "Комплексные океанографические исследования Баренцева и Белого морей." - Апатиты: изд-во Кольского филиала АН СССР. - 1987. - с.3-9.
3. Голубев В.А., Зуев А.Н., Лебедев И.А. Об объективном анализе океанографических полей по данным судовых съемок в Баренцевом море. // Труды ААНИИ. - 1989. - т.415. - с.117-126.
4. Денисов В.В., Зуев А.Н., Лебедев И.А. Научно-методические принципы организации системы океанографических наблюдений для исследования крупномасштабной изменчивости Баренцева моря. // Труды ААНИИ. - 1989. - т.415. - с.126-135.
5. Косолапов А.А., Лебедев И.А. Некоторые особенности структуры и изменчивости климатических фронтальных зон Баренцева моря. //

- Междувузовский сборник научных трудов. - Л.: изд-во ЛГУИ. -1989.-  
- вып.105. - с.89-100.
6. Зуев А.Н., Лебедев И.А. Об учете фронтальных зон при объективном анализе данных океанографических съемок.//Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Океанографические фронты северных морей: характеристики, методы исследований, модели". - М. - 1989. - с.16-17.
7. Денисов В.В., Зуев А.Н., Лебедев И.А., Петров В.С., Родин А.В. Исследования океанографических полей Баренцева моря.// В кн.: "Экология и биологическая продуктивность Баренцева моря". - М.: изд. "Наука". - 1990. - с.62-69.
8. Денисов В.В., Зуев А.Н., Лебедев И.А. Крупномасштабные океанографические съемки и их методологическое значение для комплексного изучения режима Баренцева моря.// Проблемы Арктики и Антарктики. - 1991. - вып.65. - с.121-132.
9. Голубев В.А., Зуев А.Н., Лебедев И.А. Комплекс методов статистической обработки и объективного анализа данных натуральных океанографических экспериментов.//Труды АННИИ. - 1991. - т.426. - с.7-19.
10. Костяной А.Г., Лебедев И.А., Новиков Б.А., Родионов В.Б. О вихреобразовании в Полярной фронтальной зоне Баренцева моря.// Труды АННИИ. - 1991. - т.426. - с.19-33.