

123

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРНОВА

На правах рукописи
УДК 551.465

БЖИМОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

ЧЕТЫРЕМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛИГОННЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ В ОКЕАНЕ

Специальность 11.00.08 - океанология

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

МОСКВА - 1987

Работа выполнена в Институте океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук Ю. А. Иванов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Д. Г. Сеидов

кандидат физико-математических наук А. В. Фролов

Ведущая организация - Отдел вычислительной математики АН СССР

Защита состоится " 9 " июня 1987 г. в 14 час.
_____ мин. на заседании Специализированного Совета К.002.86.02
в Институте океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР по адресу:
117218, Москва, ул. Красикова, 23.

С диссертацией
Института океан

Автореферат раз

ученный секретарь
Специализированн
кандидат географ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из фундаментальных проблем современной океанологии является исследование пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей в океане. В настоящее время установлено, что расходи течений, положение и форма фронтальных поверхностей значительно изменяется во времени. Экспериментально и теоретически показано, что в результате гидродинамической неустойчивости океанских течений генерируются энергонесущие возмущения синоптического масштаба, которые играют существенную роль при изучении процессов, происходящих в океане. Вихревые движения обладают фазовой скоростью и переносятся средними течениями. Существенная нестационарность гидрофизических полей океана значительно осложняет задачи экспериментальных исследований. Для получения адекватных представлений об эволюции полей необходимо проводить синхронные измерения на достаточно больших полигонах с высоким пространственным разрешением, что в условиях океана представляет трудно выполнимую задачу.

При реализации нестационарных гидродинамических моделей асинхронность и дискретность измерений в пространстве вносят существенные ошибки при задании начальных и граничных условий, что приводит к относительно малым временам удовлетворительного прогноза. С другой стороны мы часто располагаем информацией внутри района исследования, которую можно использовать в модели для уменьшения ошибок, связанных с неточным заданием начальных и граничных условий. В большинстве случаев это несинхронные гидрологические наблюдения, куда входят измерения температуры и солености без прямых измерений скоростей течений на полигонах в открытом океане. Предлагаемая работа ориентирована именно на такую информацию, как наиболее массовую. В работе рассматривается методика, позволяющая

В. И. Ф. С.
№ 123
Библиотека

с помощью натуральных наблюдений корректировать рассчитанные по начальным и граничным условиям гидрофизические поля внутри области определения и называемая схемой четырехмерного анализа данных гидрологических наблюдений в океане. Эта схема, включающая гидродинамическую численную модель и блок ассимиляции натуральных данных, служит для анализа и обработки полигонных измерений температуры и солености (с учетом асинхронности этих данных) и получения в итоге полей синоптического пространственно-временного масштаба основных термогидродинамических характеристик океана в районе измерений.

Цель и основные задачи исследования. Целью диссертации является формулировка, тестирование и реализация схемы четырехмерного анализа данных полигонных гидрологических наблюдений в океане. Работа направлена на решение следующих задач:

1. На основе численной модели четырехмерного анализа, предложенной Семеновым и Русецким (1986), найти эффективный метод построения начального состояния и граничных условий с использованием данных полигонных гидрологических наблюдений.

2. Усовершенствовать блок ассимиляции натуральных измерений температуры и солености и дать рекомендации к выбору оптимальных параметров весовых функций, необходимых для усвоения натуральных данных моделью.

3. Выполнить тестирование и апробацию схемы четырехмерного анализа на натуральных наблюдениях экспериментов ПОЛИМОДЕ и ГОЛЬФСТРИМ.

4. Изучить влияние характеристик усваиваемой гидрологической информации на точность восстановления гидрофизических полей.

5. Разработать методику расчета и получить оценки теплового взаимодействия океана и атмосферы на энергоактивном полигоне

ГОЛЬФСТРИМ с использованием результатов расчетов по схеме четырехмерного анализа.

Научная новизна. В работе на основе ряда численных экспериментов с данными натуральных наблюдений на полигонах ПОЛИМОДЕ и ГОЛЬФСТРИМ показана возможность использования предложенной в работе методики четырехмерного анализа гидрологических измерений в открытом океане для восстановления гидрофизических полей синоптического пространственно-временного масштаба. Получено, что эффект синхронизации данных наблюдений является важным фактором при восстановлении по данным измерений нестационарных океанских процессов. С помощью численных экспериментов с усвоением различного объема натуральной информации показано, что возможно уменьшение объема натуральных наблюдений температуры и солености на полигоне без ухудшения точности восстановления гидрофизических полей. В работе получены оценки теплового взаимодействия океана и атмосферы в районе течения ГОЛЬФСТРИМ, которые согласуются с результатами метеонаблюдений.

Практическое значение. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для обработки и анализа наблюдений температуры и солености, выполненных на гидрофизических полигонах. Выводы об оптимизации проведения полигонных съемок могут оказаться полезными при планировании и выполнении океанологических экспериментов. Методика расчета тепловых потоков на границе океан-атмосфера, основанная на слежении за лагранжевыми объемами жидкости, позволяет оценивать теплообмен между океаном и атмосферой, а по получаемым траекториям можно прогнозировать распространение примесей в океане.

Апробация работы. Основные результаты докладывались на семи-

нарах Лаборатории гидрологических процессов и Лаборатории синоптических процессов (1984 - 1986 гг.), на Второй Всесоюзной конференции по программе "Разрезы" (Одесса, 1986), на семинаре Сектора динамики океана ОВМ АН СССР (октябрь 1986 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в трех работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 35 рисунков, 4 таблицы. Список литературы включает 93 наименования, из них 43 иностранных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом параграфе введения обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, формулируются выносимые на защиту основные положения и выводы, имеющие научную новизну.

Во втором параграфе рассматривается состояние проблемы восстановления гидрофизических полей в океане по данным глубоководных наблюдений температуры и солености.

Параграф 3 посвящен краткому изложению моделей и методов восстановления полей течений в океане по данным измерений температуры и солености в предположении синхронности этих данных. В этой связи отмечается, что исторически первым и наиболее распространенным в океанологии методом, применяемым для этих целей, является динамический метод (Сандстрем и Гелланд-Ганзен, 1903) (и его модификации). Существенным развитием динамического метода стали диагностические модели, используемые для расчета течений по заданному из наблюдений полю плотности (Саркисян, 1966; 1977). Однако в ряде случаев применение этих моделей и методов затруднено из-за необходимости учитывать нестационарность процессов.

В четвертом параграфе описываются нестационарные модели, используемые для восстановления гидрофизических полей в океане, основанные на решении краевой задачи для уравнений термогидродинамики. В этих моделях данные натуральных наблюдений используются для задания начальных и граничных условий. В связи с этим возникают определенные требования к натурной информации, а именно: проведение синхронных и длительных (на период времени прогноза) измерений. Наиболее подходящими для этой цели являются наблюдения на полигоне ПОЛИМОДЕ, включающие измерения скоростей течений на системе из 19 буйковых станций и гидрологические съемки до глубины 2000 метров. Поэтому не случайно, что данные, полученные в этом эксперименте, использовались в ряде работ по моделированию гидрофизических полей в этом районе (см., например, Сеидов и Жихарев, 1981; Сеидов, 1983; 1985; Каменкович и др., 1981; 1983; 1985; Неелов и Чаликов, 1981; Грачев и др., 1984). При реализации численных моделей синоптической изменчивости в открытом океане, основанных на решении краевых задач, основным источником ошибок, по-видимому, следует считать неточное задание начальных и граничных условий. При использовании для этих целей данных полигонных гидрологических съемок (см., например, Сеидов, 1985) проблема состоит в нерегулярности этих измерений в пространстве и асинхронности по времени, а при задании начальных и граничных условий с помощью наблюдений скоростей течений (см., например, Каменкович и др., 1985) - в относительно большой дискретности измерений в пространстве.

В пятом параграфе излагаются схемы четырехмерного анализа данных полигонных гидрологических наблюдений в океане. Схема четырехмерного анализа включает два блока - гидродинамический и ассимиляционный. Гидродинамический блок основан на решении краевой задачи для системы уравнений термогидродинамики. При этом могут использоваться модели различного уровня сложности. Полученные в

результате прогностического этапа поля корректируются данными измерений в ассимиляционном блоке. Среди различных подходов, используемых для усвоения натурной информации в численных моделях, можно выделить статистические методы ассимиляции натуральных данных (динамико-стохастические модели) и динамические методы, которые можно применять в том случае, если статистическая обеспеченность данных неудовлетворительна. В динамико-стохастических моделях (см., например, Книш и др., 1978; Тимченко и др., 1981) при корректировке "прогностических" полей данными наблюдений в ассимиляционном блоке используются весовые коэффициенты, вычисляемые с помощью корреляционного анализа соответствующих гидрофизических полей задачи. Оценки для корреляционной функции можно получить либо непосредственно по экспериментальным данным, либо из прогностического уравнения, которое выводится на основании гидродинамической части модели. Решение такого уравнения вызывает трудности и в ряде случаев требует введения упрощающих предположений о характере корреляционных функций. В динамическом блоке усвоения данных при определении весовых коэффициентов используются физические соображения об их зависимости от геометрических параметров и кинематических характеристик исследуемых полей. Такой подход применяется в данной работе, которая является дальнейшим развитием модели четырехмерного анализа, предложенной Семеновым и Русецким (1986).

В первой главе излагается схема четырехмерного анализа данных полигонных гидрологических наблюдений в океане с динамическим блоком усвоения.

В § 1.1 описывается физическая постановка задачи. Задача ставится следующим образом. На сферической вращающейся Земле рассматривается область океана, имеющая жидкие боковые границы и переменный рельеф дна. На поверхности океана задается поток импульса и

отсутствие потоков тепла и солей, на жидких границах - температура, соленость и скорость в каждой точке, на дне - отсутствие потоков тепла и солей. Для параметризации диссипации импульса около дна вводится придонный слой трения, на нижней границе которого ставятся условия прилипания для скоростей. Начальные и граничные условия задаются с некоторой ошибкой, которая определяется асинхронностью по времени и дискретностью в пространстве натуральных данных, но считаются известными точные значения температуры и солености внутри области расчетов в некоторых точках пространства-времени (эти величины получены из измерений). Задача состоит в восстановлении эволюции гидрофизических полей на период проведения асинхронных наблюдений.

В § 1.2 описан динамический блок модели. Исходная система дифференциальных уравнений записывается в сферической системе координат с использованием приближений квазистатики, Буассинеска, традиционного приближения при записи силы Кориолиса, традиционного предположения о пропорциональности турбулентных потоков импульса, тепла и соли градиентам средних полей этих характеристик. Ассимиляция натуральных измерений температуры и солености моделью описывается при помощи слагаемых в уравнениях тепла и соли, имеющих вид ньютоновских источников, пропорциональных разности приведенных к узлам сетки с использованием весовых функций значений температуры и солености и модельных значений этих характеристик. Эти слагаемые вводятся по аналогии с работой Сармиенто и Брайна (1982). На поверхности океана задаются напряжение трения ветра и отсутствие потоков тепла и солей, на боковых жидких границах - значения температуры, солености и скорости, причем при формулировке этих условий использована методика Орланского (Орланский, 1976), в соответствии с которой на "бтекающих" жидких границах (где возмущения вносятся в расчетную область) значения неизвестных функций

(температура, соленость и скорость) считаются заданными, а на "вытекающих" - рассчитываются по уравнению излучения Зоммерфельда. Для параметризации трения о дно вводится придонный слой, на нижней границе которого ставятся условия прилипания для скоростей и отсутствия потоков тепла и солей. В качестве начальных условий используются либо климатическое состояние, либо поля, рассчитанные по данным гидрологической съемки, которые считаются синхронными. При решении системы уравнений используется интегральная функция, в качестве которой выбрано придонное давление P_n . Для нее из исходной системы уравнений с использованием граничных условий на поверхности и дне океана выводится эллиптическое уравнение и на границе ставится условие $P_n|_r=0$, означающее задание уровня океана динамическим методом. Для нахождения гидростатического давления используется диагностическое уравнение для P_n и прогностическое для интегрального по глубине вихря скорости. Вертикальные движения рассчитываются из уравнения вихря, проинтегрированного по вертикали в соответствующем слое. Горизонтальные скорости вычисляются по квазигеострофическим соотношениям с учетом вязких слагаемых. Для расчета температуры и солености используются эволюционные уравнения.

Параграф 1.3 посвящен описанию блока усвоения. Оценка поля температуры T (аналогично для солености) в момент времени t_k будет состоять из карты прогностических значений T_0 , к которым добавляются значения поля невязок прогноза:

$$T = T_0 + \Delta T_{ij} \quad (1)$$

где T - новое значение переменной, ΔT_{ij} - корректировка. Для ΔT_{ij} используется выражение (Бенджамин, Симэн, 1985):

$$\Delta T_{ij} = \sum_{k=1}^N W_{ijk}^2 \Delta T_k / \sum_{k=1}^N W_{ijk}^2; \quad W_{ijk} = W_{ijk} \cdot W_t \quad (2)$$

где N - количество наблюдений, ΔT_k - разность в точке измерений между наблюдаемым и модельным значениями, W_{ijk} , W_t , W_{ijk} - соответственно пространственная, временная и полная весовые функции. При интерполяции измерений по пространству в качестве весовых функций могут использоваться круговая (Крессман, 1959):

$$W_{ijk} = (R^2 - d_{ijk}^2) / (R^2 + d_{ijk}^2) \quad d_{ijk} < R \quad (3)$$

$$W_{ijk} = 0 \quad d_{ijk} \geq R$$

где R - радиус влияния точки наблюдений, d_{ijk} - расстояние от точки наблюдений K до точки сетки (i, j) ; а также эллиптическая или "банановидная" функции (Бенджамин, Симэн, 1985), у которых радиус влияния вдоль течения больше, чем поперек. Для интерполяции измерений по времени в данной работе используется функция:

$$W_t = \cos((t - t_k) / R_t \cdot \pi/2) \quad |t - t_k| < R_t \quad (4)$$

$$W_t = 0 \quad |t - t_k| \geq R_t$$

где R_t - временной радиус влияния, t - время.

В § 1.4 изложена численная реализация модели, которая основана на конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений с использованием метода расщепления по физическим процессам (Марчук, 1974). Численная сетка (сетка типа "А" по классификации Аракавы) имеет постоянный шаг по горизонтали и неравномерный по вертикали со сгущением уровней у поверхности океана. Пространственные производные по горизонтали внутри расчетной области аппроксимируются соотношениями второго порядка точности, а на границе (если это требуется) - первого порядка. При решении уравнений эволюции тепла и солей на этапе адвекции применяется схема Лейтса, для уравнения интегрального вихря - трехслойная по времени схема, а для эллиптического уравнения для придонного давления используется метод верхней релаксации.

Во второй главе излагаются результаты экспериментов по тестированию схемы четырехмерного анализа на данных гидрологических наблюдений ПОЛИМОДЕ. Эксперименты по тестированию модели проводятся с использованием данных температуры и солености двух гидрологических съемок ПОЛИМОДЕ, выполненных с 20 по 26 апреля 1978 г. первая, и с 26 апреля по 1 мая 1978 г. - вторая. Расчетная разностная сетка имеет 15×15 узлов с постоянным шагом 0.25° по горизонтали и 12 уровней (0, 20, 50, 100, 150, 200, 400, 700, 1000, 1500, 3000, 5000 метров) по вертикали. Шаг по времени составляет $3 \cdot 10^4$ сек. Коэффициенты обмена импульсом, теплом и солью выбираются по результатам численных экспериментов и приняты равными соответственно по горизонтали $A_L = A_T = A_S = 3 \cdot 10^6$ $\text{см}^2/\text{с}$, а по вертикали $K_L = K_T = K_S = 10$ $\text{см}^2/\text{с}$. Напряжение трения ветра на поверхности океана равно нулю.

В § 2.1 описываются численные эксперименты по выбору оптимальных значений параметров весовых функций, необходимых для ассимиляции натуральных наблюдений температуры и солености при построении начального состояния и в процессе синхронизации измерений, а также рассматриваются вопросы релаксации фронтальных зон, возникающих в полях гидрофизических параметров при усвоении измерений моделью вследствие рассогласования модельных и измеренных величин, и определяются значения коэффициентов турбулентного обмена.

Все численные методические эксперименты, изложенные в этом параграфе, выполняются на эталонном и модельном решениях. Эталонное решение получено следующим образом. По данным первой съемки эксперимента ПОЛИМОДЕ строится начальное состояние. Затем модель интегрируется от этого состояния на семь суток без ассимиляции какой-либо информации. Полученное решение принимается за эталонное. Затем, имитируя натурные наблюдения, производится выборка значений температуры и солености из этого решения в соответствующих

точках пространства и времени, которые принимаются за "данные измерений". Сравнивая эталонное и модельное решения оценивается точность получения гидрофизических полей в результате проведения того или иного эксперимента. Используя для интерполяции "измерений" в пространстве различные весовые функции с различными значениями входящих в них параметров проводятся эксперименты по построению оптимального начального состояния и выбора функции усвоения "натурных данных" в процессе их синхронизации. Получено, что наилучшие результаты как с точки зрения точности аполоучаемых полей так и затрат машинного времени в обоих случаях дает использование круговой весовой функции Крессмана (1959).

Для оценки времени релаксации фронтальных зон и мелкомасштабных неоднородностей, возникающих при ассимиляции натуральных данных температуры и солености, в качестве тестовой задачи рассматривается эволюция эталонного решения во времени. При этом полученные результаты используются для выбора коэффициентов турбулентного обмена. Эти коэффициенты выбираются из тех соображений, что с одной стороны они должны обеспечивать сглаживание фиктивных фронтальных зон и мелкомасштабных неоднородностей, а с другой стороны - допускать возможность моделирования полей синоптического пространственно-временного масштаба. Критерием того, насколько оптимально выбраны значения коэффициентов может служить совпадение структуры модельных полей с полями, построенными по измерениям скоростей течений на полигоне (Грачев и др., 1984). В результате найдены величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена и получено, что релаксация фронтальных зон, возникающих из-за рассогласования модельных и измеренных величин, составляет около четырех суток модельного времени.

В § 2.2 излагаются результаты четырехмерного анализа данных наблюдений температуры и солености двух гидрологических съемок

эксперимента ПОЛИМОДЕ (с 20.04.78 по 26.04.78 гг. - первая, с 26.04.78 по 1.05.78 гг. - вторая). При выполнении этих численных расчетов используются параметры численной схемы, определенные в экспериментах с эталонным решением. Восстановленные в результате поля скорости сравниваются с прямыми измерениями течений на буйковой системе ПОЛИМОДЕ, а поля температуры - с распределениями, построенными по данным ХВТ-съемок полигона. В результате получено, что изложенная модель позволяет с удовлетворительной точностью восстанавливать гидрофизические поля в океане по данным гидрологических съемок. Показано, что для построения начального состояния можно использовать асинхронные наблюдения температуры и соленности. В процессе синхронизации натуральных данных точность восстановления гидрофизических полей в районе наблюдений увеличивается по мере усвоения натурной информации. Среднеквадратичные отклонения по углу наблюдаемых и рассчитанных скоростей течений в точках буйковых постановок после синхронизации данных первой съемки полигона составляют 47° на горизонтах 100, 400, 700 метров и 100° на горизонте 1500 метров, тогда как в начальном состоянии, которое есть не что иное как состояние с построенными динамическим методом полями скорости, соответствующие значения равны 80° , 67° , 67° и 120° .

Сравнение результатов расчетов по схеме четырехмерного анализа с соответствующими полями, полученными в ряде работ по моделированию синоптической изменчивости в этом районе в это же время с использованием наблюдений скоростей течений для задания начальных и граничных условий (см., например, Грачев и др., 1984; Каменквич и др., 1985), позволяет заключить об удовлетворительном согласии этих распределений.

В § 2.3 рассмотрены результаты численных экспериментов, в которых исследуется влияние параметров гидрологической съемки на точность восстановления гидрофизических полей. Для этой цели от

состояния, рассчитанного по модели к моменту окончания первой съемки полигона и принятого за начальное выполняются расчеты с различными вариантами усвоения натуральных данных второй гидрологической съемки полигона (тем самым имитируются различные схемы проведения гидрологических наблюдений). Полученные в результате расчетов поля скоростей течений сравниваются с измеренными в точках буйковых постановок, что позволяет судить о том, насколько оптимальной является та или иная схема съемки. Получено, что после синхронизации данных наблюдений точность восстановления гидрофизических полей улучшается по сравнению с инерционным (чисто гидродинамическим, без усвоения данных) прогнозом; проведение измерений на "втекающих" границах в меньшей степени и в центрах циклонических и антициклонических образований в большей позволяет уменьшить количество наблюдений, которые следует усвоить моделью, без существенного ухудшения точности получаемых полей (по сравнению с полями, полученными в результате ассимиляции всех данных гидрологической съемки).

В третьей главе излагаются результаты четырехмерного анализа данных наблюдений температуры и соленности на энергоактивном полигоне ГОЛЬФСТРИМ ($35^{\circ}-39^{\circ}30'$ с.ш., $64^{\circ}-71^{\circ}$ з.д.) зимой 1983-1984 гг.. Полученные поля температуры и скоростей течений используются для оценки теплового взаимодействия океана и атмосферы на полигоне в это время.

В § 3.1 приведены распределения основных гидрофизических характеристик на полигоне, полученных в результате четырехмерного анализа данных температуры и соленности двух полных съемок полигона, состоящих соответственно из 72 станций первая (29.12.83 по 17.01.84 гг.) и 64 станций - вторая (17.02.84 по 8.03.84 гг.) с расстоянием между станциями 30 миль. Расчетная сетка численной

модели имеет 17×12 узлов по горизонтали с равномерным шагом 0.5° и 12 уровней по вертикали (таких же, как и в экспериментах с данными ПОЛИМОДЕ). Шаг по времени составляет $3 \cdot 10^4$ сек. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом, теплом и солью приняты равными соответственно $A_L = 8 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$, $A_T = A_S = 7 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$, $K_L = K_T = K_S = 10 \text{ см}^2/\text{с}$. В блоке ассимиляции используется круговая функция Крессмана с радиусом усвоения 1° и \cos -функция по времени с радиусом усвоения равным шагу по времени. В качестве начального состояния используются климатические поля температуры и солености Принстонского университета США. Получены следующие результаты. В юго-восточной части полигона находится циклонический вихрь, который отчетливо прослеживается на картах всех гидрофизических параметров в слое главного термоклина и имеет тенденцию двигаться к основной струе Гольфстрима на север. По результатам четырехмерного анализа наблюдений температуры и солености второй съемки найдено, что вихрь захвачен струей и образовал меандр. Сравнение рассчитанных гидрофизических полей с климатическими показывает, что струя Гольфстрима смещена к северу приблизительно на 50-100 км относительно своего средноклиматического положения, и этот факт имеет место для обеих съемок.

В § 3.2 получены оценки теплового взаимодействия океана и атмосферы на полигоне во время наблюдений. Для этого рассматривается следующая физическая модель. Исходя из временного масштаба около суток в поверхностном слое океана выделяется лагранжев объем жидкости, который активно перемешивается на этом временном интервале. Его толщина H определяется в результате обработки тонкоструктурных профилей температуры, полученных с помощью зонда "Neil Brown". Для первой съемки H принята равной 12 м, а для второй - 14 м. Горизонтальный размер объема порядка шага разностной сетки, то есть 0.5° . Предполагается, что на данном временном

интервале изменение теплосодержания объема определяется исключительно тепловым взаимодействием океана и атмосферы. Это предположение представляется реальным, если учесть, что рассматривается лагранжев объем жидкости, а значит адвекция тепла течениями исключается, турбулентные потоки тепла на этом временном интервале малы, а перепад температуры между океаном и атмосферой на полигоне достигает $10-15^\circ\text{C}$. При расчете эволюции теплосодержания лагранжевых объемов интегрируются уравнения движения в виде:

$$\frac{dX}{dt} = U; \quad \frac{dY}{dt} = V; \quad \frac{dZ}{dt} = W \quad (5)$$

с начальными условиями

$$t = t_0 : \quad X = X_0; \quad Y = Y_0; \quad Z = Z_0 \quad (6)$$

которые задаются в различных точках расчетной области. Во время движения этих объемов жидкости с использованием нелинейной интерполяции полей температуры и скорости, которые были получены в результате четырехмерного анализа данных температуры и солености, контролируется изменение их теплосодержания. Получено, что основным районом теплоотдачи тепла в атмосферу на полигоне является струя Гольфстрима. В среднем по струе мощность тепловых потоков из океана в атмосферу составляет 330 Вт/м^2 для первой съемки и 410 Вт/м^2 - для второй, а максимальные значения этих потоков равны соответственно 960 Вт/м^2 , 1350 Вт/м^2 . Эти величины согласуются с результатами соответствующих метеонаблюдений, выполнявшихся в рейсе, по которым средние потоки тепла из океана в атмосферу составили $121-292 \text{ Вт/м}^2$ для первой съемки и $150-398 \text{ Вт/м}^2$ - для второй. Таким образом, смещение Гольфстрима относительно его средноклиматического положения приводит к резкому перераспределению потоков тепла в атмосферу. Представляется, что этот механизм может быть важным в формировании тепловых аномалий в атмосфере.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате проведения ряда численных экспериментов с данными натуральных наблюдений температуры и солености на полигонах ПОЛИМОДЕ и ГОЛЬФСТРИМ получено, что предложенный в работе вариант схемы четырехмерного анализа гидрологических измерений в открытом океане может быть использован для восстановления гидрофизических полей синоптического пространственно-временного масштаба. Это подтверждается результатами численных экспериментов, имитирующих эволюцию реальных синоптических возмущений в океане, а также прямым сравнением измеренных на буйковых станциях ПОЛИМОДЕ скоростей течений с соответствующими полями, полученными в результате четырехмерного анализа натуральных данных температуры и солености.

2. Показано, что для районов океана с относительно слабыми течениями при построении начального состояния по асинхронным измерениям температуры и солености и при ассимиляции натуральных данных наиболее эффективным является использование квадратичной круговой весовой функции.

3. Расчеты, проведенные с усвоением различного объема натуральных наблюдений ПОЛИМОДЕ и имитирующие разные схемы проведения гидрологических съемок полигона показывают, что при определенном расположении натуральных измерений возможно уменьшение общего объема информации, усваиваемой моделью, без существенного ухудшения точности получаемых полей. Результаты этих экспериментов могут быть использованы в качестве рекомендаций к выбору оптимальных схем выполнения наблюдений в океане.

4. Четырехмерный анализ натуральных данных температуры и солености на энергоактивном полигоне ГОЛЬФСТРИМ зимой 1983-1984 гг. показывает, что течение смещено к северу приблизительно на 50-100 км относительно своего среднеклиматического положения, что

приводит к образованию аномалии теплосодержания верхнего слоя океана, в котором происходит распространение течения. Найдено, что основным районом теплоотдачи во время проведения измерений была область струйного течения. Представляется, что этот механизм может быть важным в формировании тепловых аномалий в атмосфере. Рассчитанные величины средних тепловых потоков на полигоне находятся в согласии с результатами соответствующих метеонаблюдений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ефимов С.С. О методике анализа данных полигонных гидрологических съемок в океане. - Деп. в ВИНТИ 30.12.86 г., № 9014-В86, 13 с.

2. Ефимов С.С. Влияние параметров гидрологической съемки на точность воспроизводимого решения. - Деп. в ВИНТИ 30.12.86 г., № 9015-В86, 8с.

3. Ефимов С.С., Пантелеев Г.Г., Семенов Е.В. Оценки теплового взаимодействия океана и атмосферы на энергетическом полигоне Гольфстрима зимой 1984 года. - Изв. АН СССР, ФАО, 1987, т.23, № 3, с. 309-313.