

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П. П. ШИРШОВА

На правах рукописи
УДК 551.465

ЛИПС УРМАС КАЛЫМОВИЧ

ТИПИЗАЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ
ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

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 Академии наук СССР

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, проф. Р.В.Озмидов

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. К.Д.Сабинин

доктор геогр. наук, ст. научн. сотр. Е.А.Плахин

Ведущая организация:

Ленинградский гидрометеорологический институт

0.0 мин

в Инсти

титута

Ученый

совета

4. часов

02.86.02

дресу:

те Инс-

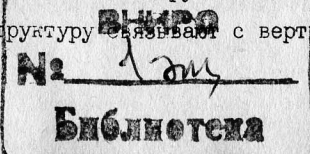
нфилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение тонкой структуры термохалинных полей океана представляет собой одно из важных направлений современной океанологии. В связи с развитием малоинерционной измерительной техники за последние два десятилетия накоплен большой материал о распространенности и о многообразии форм тонкой термохалинной структуры. Проведен ряд успешных лабораторных экспериментов и предложены математические модели развития тонкой структуры при некоторых характерных условиях.

Для более адекватной оценки параметров переноса тепла и соли в толще океана и параметризации этих процессов в крупномасштабных моделях необходимо, в частности, установить преобладающие механизмы генерации и диссипации тонкой термохалинной структуры. Существенным шагом в этом направлении была бы разработка классификации тонкой структуры термохалинных полей океана по механизмам ее генерации. Конечная цель классификации — дать рецепты двух видов: чтобы по форме тонкой структуры (или по нескольким информативным признакам) можно было с определенной вероятностью говорить о механизме ее генерации и, чтобы по нескольким фоновым гидрофизическим характеристикам можно было оценить вероятные параметры и механизм генерации.

Натурные измерения выявили существование двух ярко выраженных типов тонкой структуры термохалинных полей океана — ступенчатого и интрузионного. По происхождению ступенчатую структуру связывают с вертикальными структуро-



образующими процессами, а интрузионную – с квазиизопикнической адвекцией разной природы. Конкретные механизмы генерации и характерные параметры как ступенчатой, так и интрузионной структуры могут быть различными в различных гидрофизических условиях.

Исходя из вышеизложенного, целью диссертации являлась разработка объективных методов типизации тонкой структуры термохалинных полей океана, определение по данным натурных измерений основных ее типов и их характерных параметров (информативных признаков), позволяющих установить преобладающие механизмы генерации тонкой структуры при различных фоновых гидрофизических условиях.

Научная новизна результатов работы.

1. Разработан новый, физически обоснованный метод выделения основных типов тонкой структуры термохалинных полей океана по данным вертикальных зондирований.
2. Показано, что наблюдаемое многообразие форм тонкой термохалинной структуры океана представимо в рамках двух основных типов – интрузионного и ступенчатого.
3. Впервые сформулирована задача объективной классификации тонкой термохалинной структуры по механизмам ее генерации. Разработан способ выделения и определения параметров отдельных структурных элементов (интрузий и ступенек), с помощью введения вспомогательных переменных интрузионной и ступенчатой структур, устраняющих маскирующий эффект средней стратификации и неоднозначность выделения по профилям температуры и солёности.
4. По выработанной единой методике получены наборы

признаков для ступенчатого и интрузионного типов тонкой структуры в области бароклинного фронта и в районе с незначительными горизонтальными градиентами термохалинных полей, а также для интрузионного и ступенчатого расслоения, связанного с внутритермоклинными линзами Средиземноморской воды.

Практическая ценность работы.

1. Разработанные методы типизации и определения информативных признаков (в том числе параметров структурных элементов) могут быть использованы при создании объективной классификации тонкой термохалинной структуры по механизмам генерации и районировании океана по типам и по характерным параметрам структуры.

2. Полученные характеристики интрузионного и ступенчатого типов тонкой структуры при различных условиях в океане можно использовать для более адекватной параметризации переноса тепла и соли в главном термоклине океана и исследования влияния тонкоструктурных процессов на динамику фронтов и внутритермоклинных линз.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на коллоквиуме Лаборатории морской турбулентности Института океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР (Москва, 1985–1987 гг.), на семинаре Сектора физики моря Института термофизики и электрофизики АН СССР (г. Таллин, 1986–1987 гг.), на Всесоюзном совещании по проекту "Микроструктура" (г. Ялта, 1987 г.). Основные результаты работы изложены в 4 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 87 названий. Работа содержит 169 страниц, в том числе 113 страниц основного текста, 7 таблиц и 49 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования и кратко изложено основное содержание работы.

В первой главе дан обзор современного состояния исследований тонкой структуры термохалинных полей океана по результатам натурных экспериментов, математического и лабораторного моделирования. Под тонкой термохалинной структурой понимаются неоднородности полей температуры T , солёности S и плотности ρ , имеющие вертикальные масштабы от внешнего масштаба мелкомасштабной турбулентности $L_0 = \varepsilon^{1/2} \cdot N^{-3/2}$ (Озмидов, 1965), где ε – скорость диссипации турбулентной энергии, N – частота Вайселя (в стратифицированном океане L_0 порядка десятков сантиметров), до 100 м (или больше). Характерные отношения вертикальных и горизонтальных масштабов тонкой структуры обычно варьируют в пределах $10^{-2} - 10^{-4}$.

Основная часть информации о тонкой термохалинной структуре существует в виде данных вертикальных зондирований. В целях анализа изменение характеристик по вертикали разделяется путем фильтрации на крупномасштабную и тонкоструктурную составляющие:

$$\begin{aligned} T(z) &= \bar{T}(z) + T'(z) \\ S(z) &= \bar{S}(z) + S'(z), \end{aligned} \quad (1)$$

где $T(z)$ и $\bar{T}(z)$ – измеренный и сглаженный профили температуры, $T'(z)$ – тонкоструктурные вариации. Для определения происхождения тонкой структуры по данным вертикальных зондирований Пингри (Pingree, 1972) были предложены следующие соотношения: при кинематическом эффекте внутренних волн и при вертикальном перемешивании

$$T'/S' = m \approx \frac{\partial \bar{T} / \partial z}{\partial \bar{S} / \partial z}, \quad (2)$$

при изопикнической адвекции

$$T'/S' = m \approx \beta / \alpha, \quad (3)$$

где $\partial \bar{T} / \partial z$ и $\partial \bar{S} / \partial z$ – средние вертикальные градиенты температуры и солёности в рассматриваемом слое, $\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$,

$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial S}$. Приведенные выражения отражают наблюдаемый факт существования двух хорошо выраженных типов тонкой структуры – ступенчатого, когда квазиоднородные слои чередуются с высокоградиентными прослойками (градиенты термохалинных характеристик в прослойках имеют один знак), и интрузионного, характеризуемого чередованием слоев с противоположными по знаку вертикальными градиентами температуры и солёности. Оценку параметра m в некотором слое можно получить как отношение вторых моментов рядов T' и S' :

$$m^2 = \overline{(T')^2} / \overline{(S')^2} \quad (4)$$

или по спектрам вертикальных неоднородностей температуры и солёности. Однако здесь, как и в предложенных позже анало-

гичных способах, не обоснован выбор конкретного критерия разделения на эти два типа и не показана их достаточность для описания всевозможных форм тонкой термохалинной структуры.

Существует ряд статистических характеристик тонкой структуры, например, тонкоструктурное число Кокса

$$C_T = (\overline{\partial T' / \partial z})^2 / (\overline{\partial T} / \partial z)^2 \quad (5)$$

или нормированный третий момент ряда тонкоструктурных градиентов температуры (Журбас, Озмидов, 1984)

$$m_3 = \overline{(\partial T' / \partial z)^3} / [\overline{(\partial T' / \partial z)^2}]^{3/2} \quad (6)$$

по значениям которых можно судить о механизмах ее генерации. Полезную информацию получают и с помощью выделения самих структурных элементов (интрузий и ступенек) и определения их параметров (Федоров, Плахин, 1975; Van Aken, 1981; Журбас, 1985). Введение же набора параметров (признаков) тонких вертикальных структур полей T , S и z позволяет, очевидно, классифицировать формы структур, используя, например, приемы теории распознавания образов.

Во второй главе дана характеристика используемого экспериментального материала. Всего проанализированы данные 416 вертикальных зондирований зондами STD-Маркл и АСМ/СТД (фирмы Ниль Браун Инструментс Системс), полученные в рейсах судов ИО АН СССР и ИТЭФ АН ЭССР в Атлантический (а также в его моря) и Индийский океаны. Приведены технические характеристики зондов, результаты контроля работы датчиков, схема первичной обработки.

В третьей главе предложен метод выделения основных типов тонкой структуры термохалинных полей океана по ее статистическим характеристикам, опирающийся на соотношения Пингри (2)–(3). Рассмотрим на плоскости облако точек с координатами $(\beta S', \alpha T')$, представляющие собой данные тонкоструктурных измерений в некотором диапазоне глубин, где ряды случайных величин T' и S' можно считать однородными и где средние вертикальные градиенты температуры и солености приблизительно постоянны. Облако точек $(\beta S', \alpha T')$ будет симметричным относительно начала координат и в общем случае вытянутым вдоль некоторой прямой, составляющей угол ψ с осью абсцисс $\beta S'$. В терминах анализа главных компонент угол ψ дает направление собственного вектора ковариационной матрицы

$$\begin{bmatrix} \overline{(\beta S')^2} & \overline{\beta S' \alpha T'} \\ \overline{\alpha T' \beta S'} & \overline{(\alpha T')^2} \end{bmatrix},$$

соответствующего ее максимальному собственному значению (первая главная компонента). Угол ψ связан со вторыми моментами случайных величин $\alpha T'$ и $\beta S'$ формулами:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi &= p + \operatorname{sign} k \sqrt{p+1} \\ p &= (r^2 - 1) / 2kr, \end{aligned} \quad (7)$$

где $r^2 = \overline{(\alpha T')^2} / \overline{(\beta S')^2}$ и $k = \overline{\alpha T' \beta S'} / [\overline{(\alpha T')^2} \cdot \overline{(\beta S')^2}]^{1/2}$ – отношение дисперсий и коэффициент корреляции безразмерных флуктуаций $\alpha T'$ и $\beta S'$.

Определив угол ψ по формулам (7), вводим на плоскости $(\beta S', \alpha T')$ еще два угла ψ_u и ψ_c :

$$\operatorname{tg} \psi_u = 1, \quad \operatorname{tg} \psi_c = \bar{r}_g \quad (8)$$

где $\bar{R}_g = \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} / \beta \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}$ — среднее плотностное соотношение в рассматриваемом слое. Для однозначности дополним формулы (7) и (8) выражениями:

$$\begin{aligned} \psi_u &= 45^\circ \\ -90^\circ < \psi_c - \psi_u &\leq 90^\circ \\ -90^\circ < \psi - (\psi_u + \psi_c)/2 &\leq 90^\circ. \end{aligned} \quad (9)$$

Параметр, по которому предполагается выделять тонкую структуру интрузионного и ступенчатого типов, определим следующим образом:

$$\delta = (\psi - \psi_u) / (\psi_c - \psi_u). \quad (10)$$

В случае чисто ступенчатой структуры будет $\delta = 1$, в случае интрузионной — $\delta = 0$. Для однозначности разделения всех данных на два типа необходимо установить диапазоны значений δ , позволяющие физически обоснованно относить тонкую структуру к интрузионному или ступенчатому типу.

В этих целях воспользуемся математической моделью тонкой термохалинной структуры, в которой флуктуации $\alpha T'$ и $\beta S'$ представляются в виде суперпозиции некоррелированных вкладов ступенчатого ($\alpha T'_c$ и $\beta S'_c$) и интрузионного ($\alpha T'_u$ и $\beta S'_u$) типов, а также изотропного шума ($\alpha T'_m$ и $\beta S'_m$):

$$\begin{aligned} \alpha T' &= \alpha T'_u + \alpha T'_c + \alpha T'_m \\ \beta S' &= \beta S'_u + \beta S'_c + \beta S'_m, \end{aligned} \quad (11)$$

где входящие в правые части слагаемые будут удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} \alpha T'_u &= \beta S'_u, \quad \alpha T'_c = \bar{R}_g \beta S'_c \\ \alpha^2 (\overline{T'_m})^2 &= \beta^2 (\overline{S'_m})^2, \quad \overline{T'_m S'_m} = 0 \\ \overline{T'_u T'_c}, \overline{T'_u T'_m}, \overline{T'_c T'_m}, \overline{T'_u S'_m}, \overline{T'_c S'_m} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Критерием преобладания одного или другого типа структуры естественно брать преобладание относительного вклада термохалинных флуктуаций какого-либо типа в полную дисперсию $(\overline{\alpha T'})^2 + (\overline{\beta S'})^2$. Модельное представление (11)–(12) дает нам однозначное соответствие каждому, найденному по (7)–(10) параметру δ отношения термохалинных флуктуаций интрузионного и ступенчатого типа

$$\delta_{uc} = [\overline{(\alpha T'_u)^2} + \overline{(\beta S'_u)^2}] / [\overline{(\alpha T'_c)^2} + \overline{(\beta S'_c)^2}]. \quad (13)$$

Получено, что независимо от величины $\bar{R}_g$ значения δ из диапазона $0 < \delta < 1/2$ соответствуют значения $\delta_{uc} > 1$, а в диапазоне $1/2 < \delta < 1$ выполняется неравенство $\delta_{uc} < 1$. Последнее свойство служит обоснованием выбора в качестве одностороннего критерия выделения типов тонкой структуры неравенств:

$$\begin{aligned} \delta < 1/2 & - \text{интрузионная структура,} \\ \delta > 1/2 & - \text{ступенчатая структура.} \end{aligned} \quad (14)$$

Для апробации изложенной методики отбирались ряды температуры и солености с дискретностью 1 м (в некоторых случаях 0.5 м) по глубине в слоях толщиной 100–400 м (всего 84 участка), где свойства тонкой структуры были относительно однородны. При отборе преследовалась цель максимально полно охватить существующее многообразие тонкой термохалинной структуры как с точки зрения ее форм (по визуальному восприятию профилей $T(z)$ и $S(z)$), так и по средней термохалинной стратификации (по оценкам среднего в слое плотностного соотношения $\bar{R}_g$). Сводный график оценок параметра δ дан на рис. 1. Большое количество участков со стратификацией типа солевых пальцев ($\bar{R}_g > 1$) связано с тем, что наи-

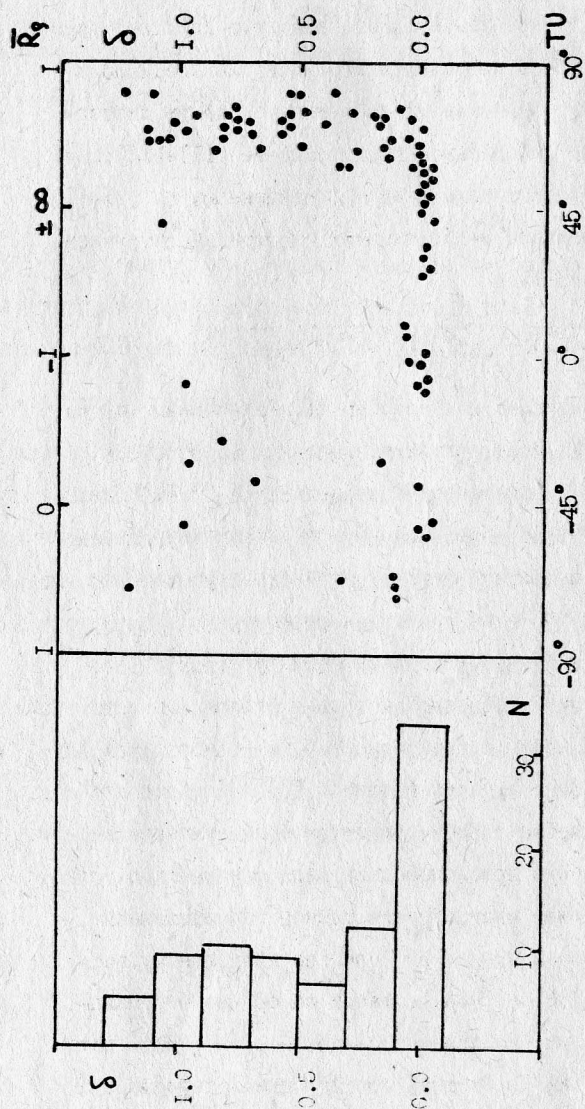


Рис. 1. Сводный график эмпирических оценок параметра δ в зависимости от среднего по слою плотностного соотношения $\bar{R}_\delta$ и угла Тернера TU . Слева дана гистограмма оценок δ .

большее число использованных данных были получены в Северной Атлантике на глубине главного термоклина.

Основной результат проведенных расчетов заключается в следующем: все оценки параметра δ по натурным данным оказались лежащими в пределах $-0.05 < \delta < 1.25$, т.е. в диапазоне, близком к диапазону $0 < \delta < 1$, соответствующему модельному представлению (II)–(I2), хотя параметр δ по (7)–(I0), вообще говоря, может принимать любые действительные значения от $-\infty$ до $+\infty$. Следовательно, анализ довольно представительных данных измерений свидетельствует о хорошей применимости модели (II)–(I2) к реальным данным и показывает, что ступенчатый и интрузионный типы достаточно полно описывают наблюдаемое многообразие тонкой термохалинной структуры океана и во введении иных типов нет необходимости.

В §3.3 показана слабая зависимость оценок параметра δ от выбираемых параметров обработки (от дискретности рядов и длины фильтра).

В четвертой главе сформулирована задача объективной классификации тонкой структуры термохалинных полей океана по механизмам ее генерации. Структуру классификатора можно представить в виде

$$A \frac{T_1^*}{\gamma} \cup \frac{T_1^*}{\chi} \times \frac{T_2^*}{\cup}, \quad (I5)$$

где A – множество структур в океане, γ – пространство описаний, χ – пространство признаков, $\cup$ – пространство решений. В алгоритм T_1^* входят первичная обработка данных измерений и сегментация вертикальных профилей T и S , в T_1^* – алгоритм получения информативных признаков, а T_2^* представ-

ляет собой решающее правило. Алгоритм сегментации включает в себя выделение участков с постоянными значениями угла Тернера (сглаженного; $\bar{R}_g = -tg(Tu + 45^\circ)$) и проверку однородности тонкоструктурных вариаций в выделенных участках. Центральной в такой постановке в настоящее время является физически обоснованный выбор информативных признаков, которыми могут служить статистические и фоновые характеристики, а также характерные параметры самих структурных элементов.

Наборы информативных признаков формируются отдельно для ступенчатого и интрузионного типов структуры, разделенных по правилу (I4). В случае ступенчатой структуры рассматриваются фоновые характеристики: среднее плотностное соотношение $\bar{R}_g$, изопикнический градиент температуры $\partial T / \partial z$; статистические характеристики: число Кокса C_T , нормированный третий момент тонкоструктурных градиентов температуры m_3 , параметр выраженности ступенек в поле плотности

$$a_g = \sqrt{12} \sigma_g / (\partial \bar{g} / \partial z \cdot L_{кор}), \quad (I6)$$

где σ_g — среднеквадратичное отклонение плотности, $\partial \bar{g} / \partial z$ — средний вертикальный градиент плотности, $L_{кор}$ — средний вертикальный масштаб тонкоструктурных неоднородностей по автокорреляционной функции ряда T' . В случае интрузионной структуры фоновыми характеристиками являются изопикнические градиенты температуры и давления — $\partial T / \partial z$ и $\partial p / \partial z$, статистическими характеристиками — относительная амплитуда интрузий

$$a_T = 2\pi \sqrt{2} \sigma_T / (\partial \bar{T} / \partial z \cdot L_{кор}), \quad (I7)$$

где σ_T — среднеквадратичное отклонение температуры, и отношение $r = \alpha \sigma_T / \beta \sigma_g$.

Главным требованием при выборе признаков является требование их информативности, которое можно качественно определить как возможность по значению признака с той или иной степенью достоверности отвечать на конкретные вопросы относительно механизма генерации тонкой структуры. Приведены пределы значений ряда признаков при известных механизмах генерации тонкой термохалинной структуры. Путем расчета характеристик по 84 отобраным участкам и анализа соответствия их значений формам вертикальных профилей (например, соответствия значений C_T , m_3 и a_g визуальному восприятию выраженности ступенек), а также анализа влияния шума в измеренных рядах и параметров обработки на значения признаков получены рекомендации для использования в алгоритмах классификации тех или иных признаков.

Для определения параметров структурных элементов разработан специальный способ выделения ступенек и интрузий с помощью введения вспомогательных переменных интрузионного и ступенчатого типов, устраняющих маскирующий эффект средней стратификации и неоднозначность выделения структурных элементов по профилям T и S . Вспомогательные переменные для интрузионной (x) и ступенчатой (y) структур выражаются:

$$x(z) = \alpha \sqrt{2} [T(z) - \bar{T}(z)], \quad (I8)$$

$$y(z) = \gamma(\bar{R}_g) \alpha \bar{R}_g^{-1} \sqrt{1 + \bar{R}_g^2} [\bar{T}(z) - \bar{T}(z)]$$

или по профилю солености

$$x(z) = \beta \sqrt{2} [S(z) - \bar{S}(z)], \quad (I9)$$

$$y(z) = \gamma(\bar{R}_g) \beta \sqrt{1 + \bar{R}_g^2} [\bar{S}(z) - \bar{S}(z)],$$

где z находится по условию $g(z) = \bar{g}(z)$ и $\gamma(\bar{R}_g) = 1$

при $\bar{R}_z > 1$, $\gamma(\bar{R}_z) = -1$ при $\bar{R}_z < 1$. Из (18)–(19) следует, что $\alpha[\bar{T}(z) - \bar{T}(z_0)] - \beta[\bar{S}(z) - \bar{S}(z_0)]$ и $\alpha[\bar{T}(z) - \bar{T}(z_0)] = \bar{R}_z \beta[\bar{S}(z) - \bar{S}(z_0)]$. Это соответствует соотношениям Пингри (2)–(3). По сравнению с модельным представлением (11)–(12) при введении вспомогательных переменных не учитывается присутствие шума. Последнее справедливо в первом приближении, так как расчеты относительного вклада шума в общую дисперсию термохалинных флуктуаций по 84 участкам показали, что $[\overline{(\alpha T'_m)^2} + \overline{(\beta S'_m)^2}] / [\overline{(\alpha T')^2} + \overline{(\beta S')^2}]$ в подавляющем большинстве случаев лежит в пределах от -3% до 12% . Однако, при сильном преобладании одного из типов имеет смысл лишь выделение элементов этого типа тонкой структуры из-за значительного влияния шума на вспомогательную переменную другого типа.

Выделение структурных элементов производится по точкам, где переменные x и y достигают промежуточных экстремумов. Параметры, которые предполагаются использовать в качестве информативных признаков, для ступенчатой структуры: ℓ , L – толщина высокоградиентной прослойки и квазиоднородного слоя, R_z^{ℓ} – плотностное соотношение в прослойке; для интрузионной структуры: h_i – толщина интрузии, ΔT_i – перепад температуры в интрузии, R_z^{+} , R_z^{-} – плотностное соотношение на противоположных границах интрузии, $\Delta \rho_i$ – отклонение плотности от среднего поля в интрузии.

На основе вышеизложенного в §4.3 предлагается алгоритм анализа тонкоструктурных измерений, включающий сегментацию профилей, определение типа тонкой термохалинной структуры, расчет набора информативных признаков и позволяющий создать объективную классификацию тонкой структуры термохалинных

полей океана при условии достаточности данных.

Пятая глава посвящена анализу (по предложенной выше методике) массивов данных измерений в районе Северо-атлантического течения, в северо-восточной части тропической Атлантики, где горизонтальные градиенты термохалинных полей относительно малы, и в районе западнее Гибралтарского пролива, где в 42-м рейсе нис "Академик Курчатов" и в 5-м и 9-м рейсах нис "Арнольд Веймер" было зарегистрировано 4 внутритермоклинных линз Средиземноморской воды.

В районе Северо-атлантического течения характерным почти для всех зондирований является наличие интенсивной тонкой термохалинной структуры интрузионного типа: $\delta \approx 0$, $\alpha_T \gg 1$. На карте распределения параметра интенсивности интрузионной структуры $\alpha_x = \sqrt{2} \sigma_x$, где σ_x – среднеквадратичное значение переменной x в слое между изопикнами $\sigma_\theta = 26.6 + 27.6$, выявлено существование нескольких зон повышенной интенсивности. Одна из этих зон связана с зарегистрированной холодной внутритермоклинной линзой. На станциях в остальных зонах наблюдаются системы интрузий со средними толщинами от 32 до 66 м (в зависимости от вертикального градиента плотности) и со средними перепадами температуры в интрузиях от 0.47 до 0.86°C . Анализ значений параметра γ и отклонений плотности от среднего в холодных и теплых интрузиях не выявил существенных нарушений изопикничности. Однако на границах интрузий наблюдаются благоприятные условия для развития процессов двойной диффузии в обоих режимах. С помощью проведенного анализа возможных механизмов генерации интрузий показано, что интенсивные интрузионные системы связаны с бароклинной не-

устойчивостью фронтального раздела (вихревыми возмущениями фронта) и с зонами ослабления бароклинности (где возникают более благоприятные условия для развития интрузий из-за процессов двойной диффузии).

В северо-восточной части тропической Атлантики обнаружены как ступенчатая, так и интрузионная структуры. На глубинах распространения Южно-атлантической центральной воды ступенчатая структура ($\delta = 1.04 \pm 0.12$) слабо выражена: $c_T < 1.0$, $a_g < 0.25$. Только в области относительно больших изопикнических градиентов температуры наблюдается структура с параметрами: $\delta = 1.08$, $c_T = 1.23$, $a_g = 0.31$, $e/L = 6/21\text{м}$. В слое между изопикниками $\sigma_t = 27.00 + 27.35$, где отношение изопикнических градиентов к вертикальным градиентам в среднем выше, чем в предыдущем слое, области с интрузионной структурой соседствуют с областями со ступенчатой структурой ($\delta = 0.07 + 0.92$). Сравнение параметров наиболее выраженных ступенчатых структур и интрузионной структуры позволило сделать вывод о возможном существовании единого механизма интрузионно-ступенчатого расчленения. Характерные параметры интрузионного типа тонкой структуры: $\delta = 0.07 \pm 0.45$, $a_T = 0.67$, $\bar{h}_i = 30\text{м}$, $\Delta T_i = 0.057^\circ\text{C}$, $\bar{R}_g^+ = 1.55$ ($\bar{R}_g^+$ — значение плотностного соотношения на границах со стратификацией типа солевых пальцев, $\bar{R}_g^+ < \bar{R}_g = 2.1$ означает, что создаются более благоприятные условия для развития солевых пальцев); выраженного ступенчатого типа: $a_g = 0.28$, $\delta = 0.81 \pm 0.92$, $e/L = 14/24\text{м}$.

Анализ тонкой структуры термохалинных полей, связанных с внутритермоклинными линзами Средиземноморской воды, во всех случаях выявил существование интенсивной тонкой струк-

туры интрузионного типа на вертикальных границах линзы и регулярной тонкой структуры ступенчатого типа ниже слоя распространения ядра, на периферии линзы. Для характеристики интрузионной структуры в слое распространения ядра линзы приведем параметры структуры на примере данных 42-го рейса нис "Академик Курчатов": внутри линзы — $\delta = 0.01$, $a_T = 1.18$, $\bar{h}_i = 53 \pm 18\text{м}$, $\Delta T_i = 0.140 \pm 0.063^\circ\text{C}$; на границах линзы — $\delta = 0.00$, $a_T = 5.32$, $\bar{h}_i = 39 \pm 20\text{м}$, $\Delta T_i = 0.178 \pm 0.080^\circ\text{C}$; вне линзы — $\delta = 0.01$, $a_T = 1.46$, $\bar{h}_i = 43 \pm 24\text{м}$, $\Delta T_i = 0.110 \pm 0.038^\circ\text{C}$. Получены свидетельства в пользу участия процессов двойной диффузии в развитии интрузионных систем.

Ступенчатая структура ниже ядра, на периферии линзы хорошо выражена не по всей окружности линзы, а только там, где горизонтальные градиенты термохалинных полей не слишком большие. Параметры ярковыраженных ступенек по данным 5-го рейса нис "Арнольд Веймер": $\delta = 0.92$, $a_g = 0.61$, $c_T = 3.99$, $m_3 = 3.20$, $e/L = 13/36\text{м}$. Изменение параметров ступенчатых структур на 4 последовательных зондированиях на радиальном разрезе через линзу (в направлении к ядру $\delta = 0.85$, $a_g = 0.38$, $e/L = 21/24\text{м}$; $\delta = 1.04$, $a_g = 0.62$, $e/L = 16/32\text{м}$; $\delta = 0.97$, $a_g = 0.66$, $e/L = 12/39\text{м}$; $\delta = 0.45$, $a_g = 0.42$, $\bar{h}_i = 51\text{м}$) выявил ухудшение выраженности ступенек в обоих направлениях: в сторону ядра линзы, как следствие слишком больших изопикнических градиентов, где возникают интрузии, и в сторону от линзы, где прослойки увеличиваются и слои уменьшаются в толщине.

Проведено сравнение полученных признаков тонкой термохалинной структуры интрузионного и ступенчатого типов при

различных фоновых условиях. В заключении суммируются основные выводы и результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан объективный метод выделения основных типов тонкой структуры термохалинных полей океана, опирающийся на соотношения Пингри и основанный на оценке параметра выделения по вторым моментам рядов тонкоструктурных вариаций температуры и солености. С помощью предложенной в работе математической модели тонкой структуры дано физическое обоснование критерия разделения.

2. Анализ многочисленных данных вертикальных STD-зондирований в Атлантическом и Индийском океанах показал, что наблюдаемое многообразие форм тонкой структуры термохалинных полей океана представимо в рамках двух основных типов — интрузионного и ступенчатого.

3. Сформулирована задача объективной классификации тонкой структуры термохалинных полей океана по механизмам ее генерации. Разработан способ выделения и определения параметров отдельных структурных элементов (интрузий и ступенек) с помощью введения вспомогательных переменных интрузионной и ступенчатой структур, устраняющих маскирующий эффект средней стратификации и неоднозначность выделения по профилям температуры и солености.

4. По выработанной единой методике получены наборы информативных признаков для интрузионного и ступенчатого

типов тонкой структуры в области бароклинного фронта, в районе с малыми горизонтальными градиентами термохалинных полей и для интрузионного и ступенчатого расслоения, связанного с внутритермоклинными линзами Средиземноморской воды. Показано, что:

а) наиболее интенсивные интрузионные системы связаны с вихревыми возмущениями бароклинного фронта;

б) характерные параметры тонкой термохалинной структуры интрузионного и ступенчатого типов центральных вод свидетельствуют о их возможной взаимосвязи;

в) системы ступенек, связанные с внутритермоклинными линзами, зарегистрированы ниже ядра, на периферии линзы; в сторону от центра линзы ступеньки исчезают путем постепенного вырождения, а в сторону ядра линзы квазиоднородные слои превращаются в холодные интрузии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Журбас В.М., Липс У.К. О выделении основных типов тонкой термохалинной структуры океана // Океанология. 1987. Т. 27. Вып. 4. С. 562-567.
2. Журбас В.М., Лаанеметс Я.Я., Липс У.К. О происхождении тонкой термохалинной структуры на разрезе о. Медвежий — с. Западный Шпицберген — кромка льда // Структура гидрофизических полей Норвежского и Гренландского морей. М., 1987. С. 38-43.
3. Журбас В.М., Лаанеметс Я.Я., Липс У.К., Висумаа Ю.Ю. и

вопросу о возможности классификации тонкой термохалинной структуры океана по результатам расчета ее статистических характеристик//Структура гидрофизических полей Норвежского и Гренландского морей. М., 1987. С. 43-48.

4. Zhurbas V.M., Lips U.K. Steplike and intrusivelike fine thermohaline structure of the ocean//Abstracts of XIX General Assembly of IUGG, Vancouver, Canada, August 9-22, 1987. Vancouver, 1987. V. 3. P. 1040.

60x90/16
Печ. л. 12,0.

Т-23360.
Зак. №132.

Подписано к печати 04.12.1987 г.
Тираж 100.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова Академии наук СССР
Москва, ул. Красикова, дом 23.