

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ТИХООКЕАНСКИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. В.И. ИЛЬЧЕВА

На правах рукописи


Лазарюк Александр Юрьевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ В ОКЕАНЕ**

Специальность 25.00.28 – океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владивосток 2006

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской Академии наук.

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук

В.И. Пономарев

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Ю.Д. Чашечкин

Доктор технических наук

В.И. Коренбаум

Ведущая организация:

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр

Защита диссертации состоится *15 декабря 2006 г. в 13 часов* на заседании
диссертационного совета Д.005.017.02 в Тихоокеанском океанологическом институте
им. В.И. Ильичева ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тихоокеанского
океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН.

Автореферат разослан

«10» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат географических наук



Ф.Ф. Храпченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прямые океанографические измерения по-прежнему являются одним из основных источников информации о физических процессах, протекающих в водной толще. При проведении натурных наблюдений в океане широко используются зондирующие СТД комплексы, регистрирующие несколько гидрологических характеристик, в частности, электропроводность (Conductivity), температуру (Temperature) и давление (или глубину, Depth). Процесс СТД зондирования в морских экспедициях осуществляют с борта дрейфующего судна, часто в условиях качки и при неблагоприятных погодных условиях. В результате различные по интенсивности помехообразующие факторы приводят к ухудшению качества СТД данных.

В соответствии с практикой экспериментальных работ погрешности измерения принято разделять на методические и инструментальные. Первые погрешности определяются методикой и условиями проведения эксперимента. Вторые зависят от технических характеристик СТД зонда и изменчивости параметров морской среды. По характеру проявления выделяют три компоненты инструментальной погрешности: систематическую, случайную и динамическую. Оценка уровня случайных погрешностей измерения определяется в основном разрядностью квантования сигнала первичных преобразователей (датчиков) прибора. Систематическая погрешность, как правило, остается постоянной или закономерно меняется в диапазоне измерения и соответствует градуировочной характеристике.

Динамическая погрешность зависит от стратификации слоя морской воды, скорости движения зонда и инерционности соответствующего первичного преобразователя. В реальных условиях эксперимента из-за не стационарности движения СТД зонда инерционные характеристики датчиков изменяются в широких пределах. В этом случае погрешности СТД данных заметно возрастают при измерении параметров морской среды в сезонном термоклине.

Для изучения многих физических процессов в океане требуется высокая точность определения таких характеристик морской воды как: температура, давление, соленость (S) и плотность (ρ). Значения параметров S и ρ рассчитываются по СТД данным с помощью эмпирических формул. Поэтому, при высоком уровне

динамических погрешностей сложно определять соленость и плотность с высокой точностью без предварительной обработки данных СТД зондирования. При расчете профиля S в температурном градиентном слое (термоклине), как правило, возникает ложная структура (псевдоструктура) солености за счет динамической рассогласованности инерционных характеристик датчиков электропроводности и температуры. Пространственный масштаб псевдоструктуры соответствует толщине слоя скачка температуры. В тонких температурных градиентных прослойках псевдоструктура солености имеет вид ложных экстремумов (salinity spikes).

Точность измерения изменчивости T , S параметров в термоклине с помощью СТД систем зависит от выбора методики и условий проведения натурального эксперимента. Применение стандартных методов коррекции данных не всегда приводит к существенному уменьшению псевдоструктуры солености. Результативность этих методов минимальна при обработке СТД данных, измеренных в условиях нестационарного режима зондирования, обусловленного качкой и дрейфом экспедиционного судна.

Высокий уровень динамической погрешности имеет место не только в данных зондов низкого разрешения, но и при эксплуатации СТД систем высокого разрешения со стабильными метрологическими характеристиками, к которым относится СТД Mark-IIIС (пр-во General Oceanics, США). В стандартной комплектации этот зонд содержит, помимо платинового термометра сопротивления, дополнительный малоинерционный термистор. Опрос основных датчиков СТД Mark-IIIС осуществляется с частотой 25 Гц.

В 80-90-е годы зонды серии Mark-III широко использовались в океанографии, с их помощью выполнены многочисленные эксперименты, включая лабораторные. Поэтому, из существующих серийных СТД систем, комплекс Mark-IIIС оптимально подходит для изучения проблемы динамических погрешностей.

Цель диссертационной работы – усовершенствовать методы коррекции данных, рассмотрев основные физические эффекты, сопровождающие процесс СТД зондирования.

Для достижения цели поставлены следующие задачи.

1. Определить закономерности влияния внешних факторов на процесс измерения физических параметров морской воды первичными преобразователями (датчиками) СТД зонда.

2. Модифицировать способы анализа и коррекции СТД данных, позволяющие выявить и устранить динамические погрешности измерения.

3. Исследовать методы динамической коррекции данных с использованием численной модели СТД измерения в термоклине.

4. Апробировать методы коррекции натуральных данных СТД измерений, полученных зондами высокого и низкого разрешения.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись методы теории динамических погрешностей, статистического анализа и численного моделирования процесса СТД измерения.

Научная новизна. В диссертационной работе предложены новые функциональные зависимости инерционных коэффициентов датчиков СТД зонда от скорости набегающего потока жидкости. Дана оригинальная физическая интерпретация известных результатов лабораторных экспериментов по определению динамических характеристик преобразователей СТД зонда.

Выявлены закономерности проявления динамической погрешности измерений температуры, электропроводности и рассчитанной солености.

Выполнены оценки влияния нелинейных эффектов на инерционные характеристики температурных датчиков СТД зонда Mark-IIIС. Выявлены характерные особенности проявления динамической погрешности измерения при нестационарном режиме зондирования.

Определены эффективные методы коррекции данных СТД измерения.

Практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты позволяют:

- повысить качество обработки СТД данных и достоверность анализа термохалинных структур;

- выбрать эффективные методы проведения комплексных экспериментов в океане с использованием имеющихся СТД систем;

- определить оптимальное сочетание технических характеристик основных первичных преобразователей и электронных блоков при проектировании новых моделей СТД комплексов.

Автор является руководителем инициативного проекта ДВО РАН №06-III-A-07-257 «Исследование влияния нестационарного режима СТД зондирования на динамические погрешности измерения».

Результаты работы использовались при выполнении НИР «Создание пакета программ по устранению ложных величин солености в данных СТД зондирований» (№3-8 от 01.07 2004 г, заказчик ФГУП «ТИНРО-Центр»). Имеется Акт внедрения от 04 июля 2006 г., выданный ФГУП «ТИНРО-Центр».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Инерционные коэффициенты датчиков температуры и электропроводности СТД зонда имеют функциональные зависимости от режима их обтекания и толщины пограничного слоя жидкости. Эти зависимости позволяют объяснить результаты лабораторных экспериментов.

2. При устранении динамических погрешностей СТД измерений, выполненных зондом высокого разрешения, наиболее эффективным является метод оптимального экспоненциального обострения данных в сочетании с процедурой смещения температурного профиля.

3. При нестационарном режиме СТД зондирования (обусловленном дрейфом и качкой судна) на интервалах максимума скорости движения зонда отмечается стандартная расогласованность измерений электропроводности и температуры, когда динамические погрешности устранимы до уровня случайных ошибок.

На интервалах уменьшения скорости движения прибора отмечается нестандартная расогласованность, когда снижается эффективность методов устранения динамической погрешности.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных конференциях: "Fluxes and Structures in Fluids. Moscow. 2005", «Bridges of science between North America and Russian Far East, Vladivostok. 2004», а также на научно-практической конференции «Гидрометеорология Дальнего Востока и окраинных морей Тихого океана. Владивосток. 2005».

Личный вклад автора. Автор внес основной вклад в теоретические оценки, разработку и модификацию методов коррекции данных СТД измерений, а также участвовал в организации и проведении отдельных натуральных экспериментов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 124 наименования. Работа представлена на 163 страницах, включая 51 рисунок и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается обоснование актуальности темы, формулируются цель и основные задачи исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется влияние физических процессов на динамические погрешности измерения давления, температуры, электропроводности и солености в морской среде.

В разделе 1.1 представлен обзор литературы, рассмотрены основные проблемы СТД зондирования толщи морской воды. В разделе 1.2 даны определения погрешности СТД измерения, включая динамическую погрешность, которая возникает при зондировании неоднородной жидкости.

В разделе 1.3 рассматриваются особенности инерционных эффектов, сопровождающих процесс СТД измерения. Отмечается, что динамические свойства датчиков СТД зонда при измерении электропроводности (C_m) и температуры (T_m) в стратифицированном слое морской воды $T_r \neq \text{const}$ и $C_r \neq \text{const}$ принято описывать линейными дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$T_r(t) = T_m(t) + R_c T_m'(t); \quad C_r(t) = C_m(t) + R_c C_m'(t) \quad (1)$$

с начальными условиями: $T_m(t_0) = T_0; \quad C_m(t_0) = C_0, \quad (2)$

где T_m' , C_m' – производные измеренных параметров, а R_i и R_c – инерционные коэффициенты соответствующих датчиков. Коэффициенты R_i и R_c зависят от свойств материала чувствительных элементов датчиков, их ориентации в потоке жидкости, от скорости этого потока (V) и числа Рейнольдса (Re).

Существующие рекомендации дают оценку инерционности датчика электропроводности (ДЭ) независимо от режима обтекания $R_c \sim L/V$ (где L – характерная длина ДЭ). В то же время инерционность температурного датчика (ДТ) определяют эмпирической функцией вида $R_c \sim V^n$, где показатель степени (n) варьируется от $n \approx 0$, если $Re \leq 10$, до $n \approx 2/3$ при $10^3 \leq Re \leq 10^5$. При этом отмечается, что изменения показателя степени обусловлены эффектом пограничного слоя.

В работе предлагается учитывать этот эффект при определении динамических характеристик датчиков СТД зонда. Известно, что при ламинарном режиме обтекания (числа Рейнольдса не достигают критических величин, $Re < Re^{cr}$), толщина пограничного слоя имеет зависимость $h \sim V^{-1/2}$. Рассматривая турбулентный режим обтекания ($Re \geq Re^{cr}$), необходимо учитывать, что на практике скорость зондирования в редких случаях достигает 3 м/с. В этом случае толщину погранслоя можно оценить константой $h \sim v^*/V \approx const$, т.к. $V \sim v^* \ln(v^*) \approx v^*$ (где v^* – среднеквадратичная скорость турбулентных пульсаций омывающего потока).

Из существующих серийных СТД систем характеристики зонда Mark-III наиболее подробно исследованы. Результаты лабораторных экспериментов с датчиками этого зонда представлены в открытой печати. Кроме того, конструкция СТД Mark-III такова, что его датчики, как правило, свободно омываются невозмущенным потоком жидкости.

Анализ опубликованных результатов лабораторных экспериментов с ячейкой проводимости Neil Brown (NB), штатного ДЭ зонда Mark, позволил получить зависимость $R_c(V)$, рис. 1а. При ламинарном режиме обтекания - $R_c \approx 0.026V^{-3/2}$, а при турбулентном ($V \geq 1$ м/с) - $R_c \approx 0.026V^{-1}$. Предлагаемый вид зависимости $R_c \sim h/V$ более полно отражает эффект погранслоя в отличие от соотношения $R_c \sim L/V$. В обобщенном виде инерционность датчика электропроводности описывается выражениями:

$$R_{c,Д}(V, Re_c < Re_c^{cr}) \approx K_{c,Д} V^{-3/2} \quad \text{и} \quad R_{c,Т}(V, Re_c \geq Re_c^{cr}) \approx K_{c,Т} V^{-1}, \quad (3)$$

где коэффициенты $K_{д}$ и $K_{ст}$ имеют размерность $[м(м/с)^{1/2}]$ и $[м]$ соответственно.

В открытой печати не представлена информация о динамических свойствах термометра сопротивления Rosemount, который является основным ДТ зонда Mark. Поэтому в работе анализировались опубликованные результаты лабораторных экспериментов с термометрами сопротивления зонда Исток (МГИ, г. Севастополь) и термистором Fenwal (дополнительный ДТ зонда Mark). Известно, что, помимо эффекта погранслоя, на инерционность термодатчика оказывают влияние его геометрические размеры и свойства материала чувствительного элемента. Следовательно, выделяя постоянную и переменную компоненты, предлагается зависимость $R_t(V)$ оценивать двумя слагаемыми. Полученные инерционные характеристики в обобщенном виде соответствуют выражениям:

$$R_{д}(V, Re, < Re_{cr}) \approx K_{дL}^* + K_{дL} V^{-1/2} \quad \text{и} \quad R_{т}(V, Re, \geq Re_{cr}) \approx K_{тT}. \quad (4)$$

На рис. 1а представлена оценочная характеристика $R_t(V)$ для термометра Rosemount. При определении скорости $V_t^{cr} \approx 0.6$ м/с и соответствующих коэффициентов $R_t(V)$: $K_{дL}^* \approx 0.10$ с, $K_{дL} \approx 0.115$ с(м/с)^{1/2} и $K_{тT} \approx 0.22$ с, учитывались результаты лабораторных экспериментов с термометрами зонда Исток, а также данные, указанные в описании СТД комплекса Mark-IIIС.

В разделах 1.4 и 1.5 представлены оценки влияния скорости движения зонда на возможные пределы динамических погрешностей данных СТД измерения.

Электропроводность морской воды представим линейной функцией солености (S), температуры и давления (P):

$$C_t(t) \approx C_0 + \beta S_t(t) + \gamma T_t(t) + \epsilon P_t(t), \quad (5)$$

где $\beta(S, T) = [\partial C / \partial S]_{T, P}$, $\gamma(S, T) = [\partial C / \partial T]_{S, P}$ и $\epsilon = [\partial C / \partial P]_{S, T}$ - переменные коэффициенты. Если стратификация слоя морской воды соответствует условию

$$|\beta S_t'| < |\gamma T_t'|, \quad (6)$$

то при зондировании со скоростью $V(t) \approx \text{const}$ динамические погрешности СТД измерения соответствуют выражениям:

$$\Delta_d T_m(t) \approx R_t(t) T_m'(t) \approx R_t V T_t'(z), \quad (7)$$

$$\Delta_d C_m(t) \approx R_c(t) C_m'(t) \approx \gamma R_c V T_t'(z). \quad (8)$$

Учитывая (3-8), величины $\Delta_d C_m(t)$ и $\Delta_d T_m(t)$ взаимосвязаны, и оценка динамической погрешности рассчитанной солёности имеет вид:

$$\Delta_d S_m(t) \approx \beta^{-1} R_c C_m'(t) - \beta^{-1} \gamma R_t'(t) T_m'(t). \quad (9)$$

На рис. 1б представлены графики относительных величин динамических погрешностей температуры $G_t(V) = \Delta_d T_m / T_r'$, электропроводности $G_c(V) = \Delta_d C_m / [\gamma T_r']$, и солёности $G_s(V) = \Delta_d S_m / [\beta^{-1} \gamma T_r']$ (рассчитанные с учетом (3-4) для случая $T_r'(z) \neq 0$, $S_r(z) = \text{const}$, $\beta = \gamma$), которые демонстрируют равенство погрешностей $G_t(V) \approx G_c(V)$ и минимум $G_s(V) \approx 0$ при $V \approx 0.2$ м/с. При увеличении скорости зондирования отмечается рост динамической погрешности измерения температуры и солёности. В то же время погрешности измерения электропроводности уменьшаются.

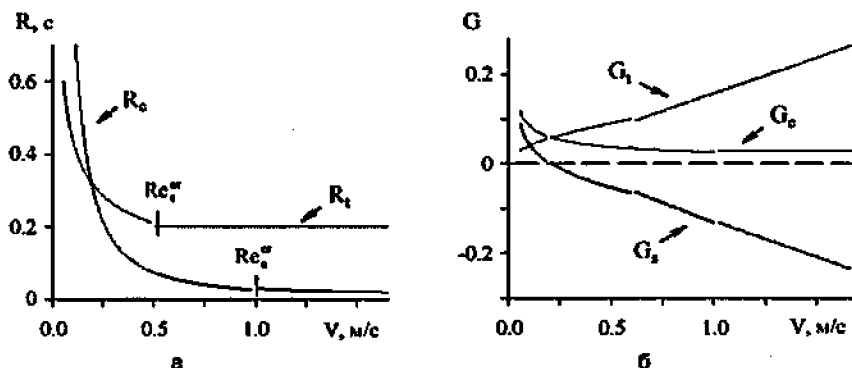


Рис. 1. Инерционные характеристики платинового термометра Rosemount $R_t(V)$ и ячейки NB $R_c(V)$ (а), а также соответствующие относительные величины динамических погрешностей температуры $G_t(V)$, электропроводности $G_c(V)$ и солёности $G_s(V)$ (б) при различных скоростях зондирования СТД Mark-III.

Во второй главе исследуется влияние структуры измеряемых параметров морской воды на динамические погрешности СТД данных.

Датчики СТД зонда обычно рассматриваются как линейные измерительные преобразователи (ИП) с сосредоточенными параметрами. Каждому такому ИП соответствует некоторый линейный оператор $W_X(t)$, который показывает, каким образом из характеристики $X_r(t)$ процесса на входе этого преобразователя получается характеристика $X_m(t)$ на его выходе, $X_m = W_X X_r$.

линейный оператор $W_X(t)$, который показывает, каким образом из характеристики $X_i(t)$ процесса на входе этого преобразователя получается характеристика $X_m(t)$ на его выходе, $X_m = W_X X_i$.

В работе рассматривается слой морской воды, в пределах которого, $z \in [z_0; z_B]$, градиент солености мал (6) либо отсутствует вовсе $S_i(z) = S_0$, а температурная стратификация описывается гармонической функцией с постоянными параметрами:

$$T_i(z-z_0) = T_0 + T_A \cos(2\pi[z-z_0]/Z), \quad (10)$$

где Z – пространственный масштаб вариаций, T_A – амплитуды этих вариаций, а $T_0 = \text{const}$ – средняя температура в слое. В этом случае оператор температурного ИП W_Y , учитывая (1-2), соответствует частотной характеристике $\Psi_i(iY)$:

$$\Psi_i(iY) \approx A_i(Y) \exp[iF_i(Y)] = [1 + Y^2 R_i^2]^{-0.5} \exp[-i \arctg(YR_i)], \quad (11)$$

где $i = \sqrt{-1}$, $Y = 2\pi V/Z$ – частотный параметр измеряемого слоя, $A_i(Y)$ – амплитудная и $F_i(Y)$ – фазовая частотные функции термометра. Характеристика $\Psi_e(iY)$: измерителя электропроводности аналогична (11). Описание процесса СТ измерения упрощается при использовании обобщенной формы представления температурного профиля:

$$T_i(z-z_0) = T_0 + T_A \exp(i2\pi[z-z_0]/Z), \quad (12)$$

с условием, что интерпретация результатов ограничивается действительной частью выражения (12). В этом случае профили $T_m(t)$ и $C_m(t)$ соответствуют выражениям:

$$T_m(t-t_0) = T_0 + T_A A_i \exp(iY[t-t_0 + Y^{-1}F_i]), \quad (13)$$

$$C_m(t-t_0) = C_0 + \beta S_0 + \epsilon P_i(t-t_0) + \gamma T_0 + \gamma T_A A_e \exp(iY[t-t_0 + Y^{-1}F_e]). \quad (14)$$

Отмечается, что 95% точность измерения амплитуды T_A распределения (10) достигается, если при пересечении неоднородностей интервал времени ($\Phi = Z/V$) превышает масштаб $\Phi \geq 20R$. На рис. 2 представлены амплитудные, $A_i(\Phi)$ и $A_e(\Phi)$, а также сдвиговые (фазовые), $G_i(\Phi) = -2\pi Y^{-1}F_i$ и $G_e(\Phi) = -2\pi Y^{-1}F_e$, частотные функции датчиков зонда Mark, рассчитанные для характерных величин $V = 1$ м/с, $R_i = 0.2$ с и $R_e = 0.03$ с. Точками на графиках отмечены 95% уровни частотных функций, которым соответствуют масштабы $\Phi_s \approx 4$ с и $\Phi_c \approx 0.6$ с. Влияние параметра V на амплитудные частотные функции СТД Mark-III $A_i(V)$ и $A_e(V)$ при измерениях температурного профиля (10) при $Z = 1$ м демонстрирует рис. 3а.

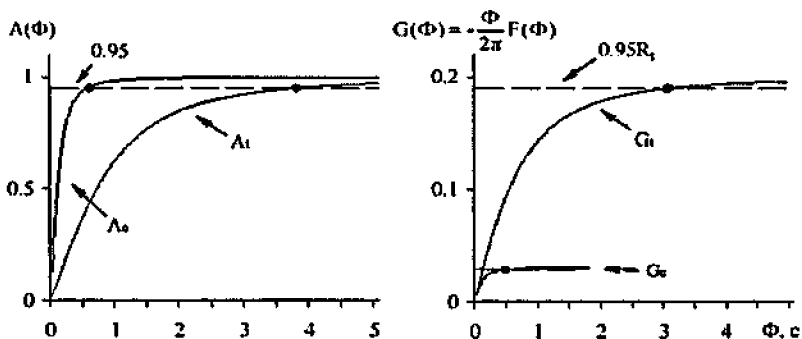


Рис. 2. Частотные функции платинового термометра, $G_1(\Phi) = -\Phi F_1 / [2\pi]$ и $A_1(\Phi)$, ячейки проводимости $G_0(\Phi) = -\Phi F_0 / [2\pi]$ и $A_0(\Phi)$, рассчитанные для скорости движения зонда Mark V=1 м/с ($R_1=0.2$ с и $R_0=0.03$ с) при различных масштабах ($\Phi=Z/V$) термической структуры (10).

В разделе 2.2 анализируются проявления динамической рассогласованности СТД данных при определении профиля солености.

Как правило, в процессе СТД измерения инерционные коэффициенты не равны, $R_1 \neq R_0$ (обычно $R_1 \gg R_0$), и наличие температурного градиента в исследуемом слое приводит к рассогласованности структур измеренных профилей $C_m(t)$ (14) и $T_m(t)$ (13) по амплитуде, $A_1 \neq A_0$, и фазе, $F_1 \neq F_0$. При расчете профиля $S_m(t)$ динамическая рассогласованность СТД данных проявляется в виде псевдоструктуры солености (ПСС):

$$\Delta_d S_m(t-t_0) \approx \beta^{-1} \gamma T_A \{1 - A_1/A_0 \exp(iY[G_1 - G_0])\} A_0 \exp(iY[t-t_0 + G_0]). \quad (15)$$

Если исследуемый слой отличается высокой частотой температурных вариаций (10), $Z \leq V\Phi_c = Z_c$, то ложная структура солености (15) определяется амплитудной рассогласованностью измеренных параметров $A_1/A_0 \ll 1$. Сдвиговая (фазовая) рассогласованность при $Z \leq Z_c$ минимальна либо отсутствует вовсе $\Delta G_{1c} = G_1 - G_0 \rightarrow 0$. В слое с меньшей частотой изменчивости ($Z \geq V\Phi_c = Z_c$) отношение $A_1/A_0 \approx 1$, и ПСС определяется рассогласованностью сдвиговых компонент $\Delta G_{1c} \approx R_1 - R_0$. При измерении слоев, которые характеризуются $Z_c < Z < Z_0$, ложные вариации на профилях солености обусловлены как амплитудной $A_1/A_0 < 1$, так и сдвиговой $\Delta G_{1c} < R_1 - R_0$ рассогласованностью данных. На рис. 3а и 3б представлены графики отношения

частотных функций зонда Mark $A_i/A_c(V)$ и $\Delta G_{ic}(V)$, рассчитанные для (10) при $Z=\{0.25; 1; 4\}$ м.

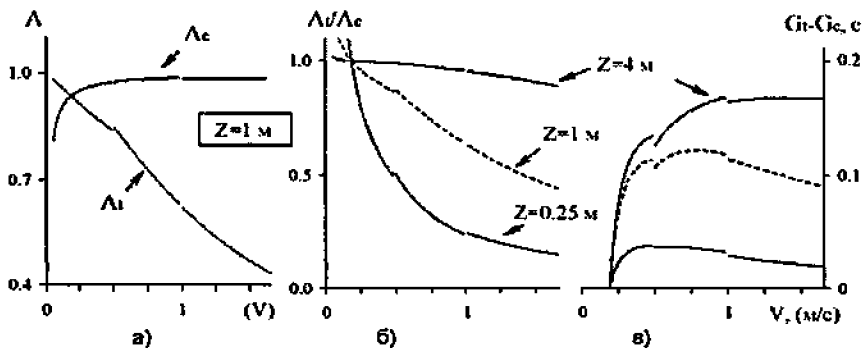


Рис. 3. Амплитудные частотные функции платинового термометра $A_i(V)$ и ячейки NB $A_c(V)$ (а), рассчитанные для термической структуры (10) при $Z=1$ м с учетом $R_i(V)$ и $R_c(V)$ (3-4). А также отношение амплитудных A_i/A_c (б) и сдвиговых $\Delta G_{ic}=G_i-G_c$ (в) частотных функций при различных скоростях движения СТД Mark и пространственных масштабах $Z=\{0.25; 1; 4\}$ м температурной неоднородности (10).

В разделе 2.3 представлены результаты модельных расчетов с использованием характеристик зонда Mark-IIIС при различных значениях параметра вертикальной изменчивости Z термической структуры (10).

Отмечается, что экспоненциальный рекурсивный фильтр:

$$T_m(t) = \exp[-\delta t/R_i] T_m(t-\delta t) + \{1 - \exp[-\delta t/R_i]\} T_i(t), \quad (16)$$

является решением задачи Коши (1-2) при $R_i = \text{const}$, где δt – единичный временной интервал опроса датчиков зонда. Комплекс СТД Mark-IIIС имеет $\delta t = 0.04$ с.

Для модельных расчетов используется вертикальный температурный профиль:

$$\begin{aligned} T_i(z) &= T_0 = \text{const}, \text{ в верхнем однородном слое } z \in (0; z_1), \\ T_i(z) &= T_0 - 0.5 T_A \{1 - \cos[2\pi(z-z_1)/Z]\}, \text{ в градиентной прослойке } z \in (z_1; z_2), \\ T_i(z) &= T_0 + T_A = \text{const}, \text{ в нижнем однородном слое } z \in (z_2; Z_0), \end{aligned} \quad (17)$$

где константы принимают значения: $T_0 = 4^\circ\text{C}$, $T_A = 0.5^\circ\text{C}$; $Z = 2\Delta z = 2(z_2 - z_1)$.

Рассматриваются примеры $T_i(z)$ (17) с толщинами $\Delta z = \{0.12; 0.5; 2\}$ м характерными для зонда Mark при скорости движения $V = 1$ м/с и коэффициентах

$R_t=0.2$ с и $R_c=0.03$ с. Благодаря отсутствию стратификации по солености $S_r(z)=33\%$ при $z \in (0; Z_b)$, обсуждаются структуры профилей $T_m(t)$ и $T_c(t)$, где $T_c(t)=\gamma^{-1}[C_m(t)-C_0 - \epsilon P(t)]$. Представленные на рис. 4а профили $T_m(t)$ и $T_c(t)$, рассчитанные по (16-17) при $\Delta z=0.5$ м, соответствуют случаю рассогласованности $Z_c < Z < Z_c$. Профили производных $T_r'(t)$, $T_c'(t)$ и $T_m'(t)$, рис. 4б, демонстрируют отношение амплитуд $\max[T_m']/\max[T_c'] \approx 0.7$ при фазовом сдвиге $\Delta G_{tc} \approx 2\delta t = 0.08$ с, кроме того, отмечается дополнительная, масштабная компонента рассогласованности данных, $V\Delta t_m \approx 2V\Delta t_c$.

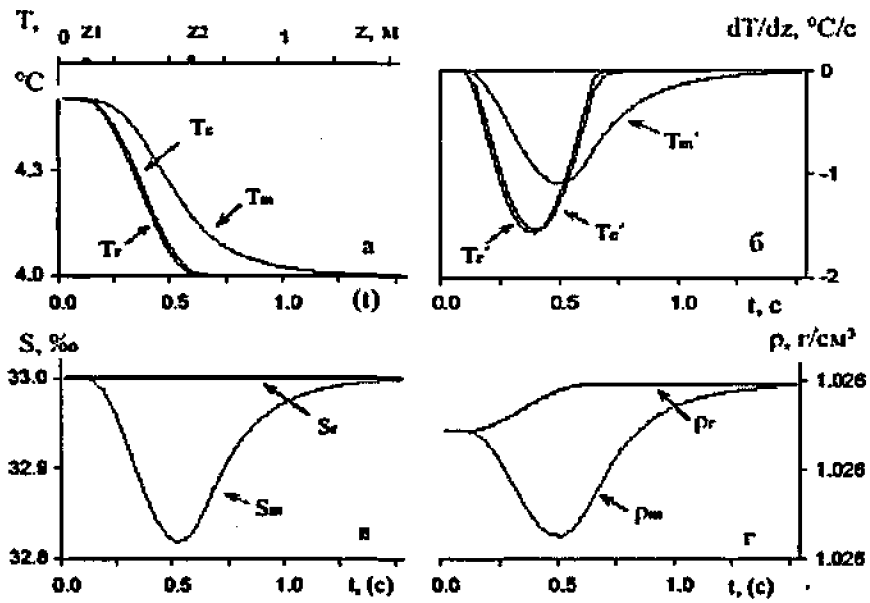


Рис. 4. Результат моделирования процесса измерения зондом Mark-IIIС, $T_m(t)$ и $T_c(t)$, температурного градиентного слоя $T_r(t)$ (17) при $\Delta z=0.5$ м (а). Производные измеренных параметров $T_c'(t)=\gamma^{-1}C_m'(t)$ и $T_m'(t)$ (б), а также проявления ложной структуры при расчете солености $S_m(t)$ (в) и плотности $\rho_m(t)$ (г).

В результате динамическая погрешность при расчете профиля солености отмечается в пределах слоя $V\Delta t_m$ и достигает $\Delta S_m(t) \leq 0.18\%$, рис. 4в. Профиль рассчитанной плотности $\rho_m(t)$, рис. 4г, также содержит псевдоструктуру, а именно, ложный плотностной инверсионный слой и смещение градиентной прослойки на профилях $\rho_m(t)$ относительно заданного истинного распределения $\rho_r(t)$.

В третьей главе рассмотрены основные методы коррекции, сгруппированные по характерному принципу построения алгоритма обработки СТД данных (за исключением цифровых фильтров). Эффективность этих методов анализируется с привлечением результатов модельных расчетов. Наличие и уровень динамической погрешности измерения оцениваются по статистическим характеристикам СТД данных. Показано преимущество критерия, учитывающего изменение дисперсии высокочастотной компоненты профиля солености, σ_S .

В разделе 3.2 обсуждается устранение фазовой рассогласованности профилей измеренной электропроводности и температуры с помощью процедуры смещения:

$$T_{\lambda}(t) = T_m(t+\lambda) = T_m(t+n\delta t), \quad (18)$$

где $\lambda \approx \Delta G_{ic}$. Однако после такой обработки остаются неизменными амплитудная и масштабная компоненты рассогласованности СТД данных. На рис. 5а и в табл. 1 отражены изменения при определении профиля солености $S_{\lambda}(t)$ после коррекции (18) модельных данных, «измеренных» в градиентном слое $T_{\lambda}(t)$ (17) при $\Delta z = 0.5$ м.

В разделе 3.3 отмечается, что полное устранение динамических погрешностей СТД измерения требует решения обратной задачи (1-2), т.е. необходимо осуществить обратное преобразование $X_r = W_X^{-1} X_m$. В этом случае, учитывая (16), обострение измеренных данных будет выполняться по схеме:

$$X_d(t) = [X_m(t) - E_d X_m(t - \delta t)] / [1 - E_d], \quad (19)$$

где $E_d = \exp[-\delta t / R_d]$, а R_d - параметр обострения. В идеале обработка СТД данных методом экспоненциального обострения (ЭО) (19) при $R_{d1} = R_1$ и $R_{d2} = R_c$ позволяет полностью устранить динамические погрешности и определить исходный профиль солености. Однако в процессе обострения случайные погрешности СТД измерения возрастают в $R_d / \delta t$ раз (для СТД данных зонда Mark-III $\Delta_c T_d \approx 5 \Delta_c T_m$).

Поэтому для уменьшения уровня случайной погрешности рекомендуется использовать экспоненциальное сглаживание параметра, измеренного с меньшей инерционностью. Если в процессе измерения отмечается $R_1 > R_c \geq \delta t$, то сглаживается профиль электропроводности:

$$C_s(t) = \exp[-\delta t / R_d] C_s(t - \delta t) + [1 - \exp[-\delta t / R_d]] C_m(t), \quad (20)$$

где R_s - параметр сглаживания. Метод экспоненциального сглаживания (ЭС) (20) способствует уменьшению только динамической погрешности солености $S_d(t)$, рис. 5а и табл. 1. В этом случае погрешность $\Delta_d T_m$ остается прежней, толщина слоя скачка температуры оказывается завышенной по отношению к реальной, что отмечается при расчете профиля плотности $\rho_d(t)$, рис. 5б.

В разделе 3.4 рассмотрены методы комбинирования измеренных профилей, которые предполагают уменьшение динамических погрешностей при минимальном росте уровня случайного шума СТД данных. На зондах серии Mark-III температура измеряется двумя датчиками, термометром сопротивления, профилем $T_m(t)$, и миниатюрным полупроводниковым термистором, $T_k(t)$. В инструкции по эксплуатации зонда отмечается, что термистор является вспомогательным измерителем, и при скорости зондирования $V=1$ м/с инерционные коэффициенты этих датчиков оцениваются соответственно $R_f \approx 0.2$ с и $R_t \approx 0.03$ с. Комбинирование температурных сигналов (КТС метод) реализуется по формуле:

$$T_k(t) = T_m(t) + T_k(t) - T_B(t), \quad (21)$$

где $T_B(t)$ – сигнал (либо профиль), сглаженный фильтром (20) при $R_B = \text{const}$. Однако реальный сигнал термистора содержит высокий уровень шума, что приводит к повышению в 2-3 раза случайной погрешности при расчете $T_k(t)$ и $S_k(t)$.

Практически полное устранение погрешностей как динамических $\Delta_d T_n$ и $\Delta_d S_n$, так и случайной $\Delta_c S_n$ отмечается при обработке данных высокого разрешения с помощью ТСС-метода (Temperature-Conductivity Combined Method). Автор этого метода (T. Iwao) предлагает осуществлять обострение профиля температуры путем введения поправки, которая учитывает высокочастотную компоненту профиля электропроводности:

$$T_n(t) = \gamma^{-1} C_m(t) + \langle T_m(t+\lambda) - \gamma^{-1} C_m(t) \rangle | \text{median } 1 \text{ s}, \quad (22)$$

при условии (6), т.е. малости градиента солености. Средняя величина фазового сдвига (λ) определяется графически, по критерию $\min[\sigma S]$, а процедура, обозначенная как $\langle \rangle | \text{median } 1 \text{ s}$, соответствует осреднению скользящим медианным фильтром по временному интервалу равному 1 сек. Функция $\gamma(T, S)$ рассчитывается по известным эмпирическим формулам.

Результат подобный (22) достигается с помощью метода градиентной интерполяции (ГИ) (Лазарюк, 2004). Если в исследуемом слое морской воды выполняется условие (6), то для обострения температурного профиля на интервале $t \in (t_1; t_2)$ используется производная измеренной электропроводности:

$$T_g(t) = T_g(t - \delta t) + \gamma^{-1} [C_m'(t) - \epsilon V(t)], \quad (23)$$

при

$$T_g(t_1) = T_m(t_1 + \lambda). \quad (24)$$

Величина сдвига λ определяется для каждого слоя по критерию $\min[\sigma S]$.

В разделе 3.5 рассмотрены методы коррекции с использованием производных измеренных параметров. При градиентной коррекции (ГК), учитывая (18) для $R > \delta t$, восстановление исходных структур СТД данных на интервале, включающем градиентную прослойку, осуществляется с помощью выражений:

$$T_j(t) = T_m(t) + k_{jt} R_t T_m'(t) \approx T_m(t) + K_{jt} T_m'(t), \quad (25)$$

$$C_j(t) = C_m(t) + k_{jc} R_c C_m'(t) \approx C_m(t) + K_{jc} C_m'(t), \quad (26)$$

где коэффициенты k_{jc} и k_{jt} (либо K_{jc} и K_{jt} , если неизвестны R_c и R_t) определяются по критерию $\min[\sigma S]$. Отмечается низкая эффективность устранения псевдоструктуры солености $S_k(t)$ при коррекции только температурного профиля (метод ГКТ) (25) по сравнению с результатом применения метода ГК (25-26), табл. 1.

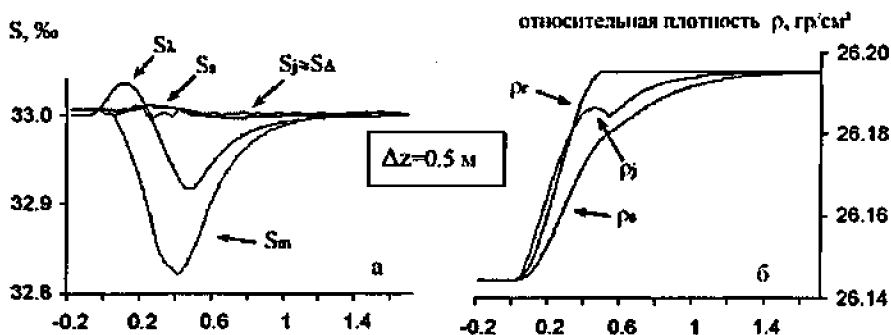


Рис. 5. Профили солености $S_m(C_m, T_m)$, $S_\lambda(C_m, T_\lambda)$ (18), $S_\alpha(C_\alpha, T_m)$ (20), $S_j(C_j, T_j)$ (25-26) (а) и плотности $\rho_\lambda(S_\lambda, T_\lambda)$, $\rho_\alpha(S_\alpha, T_m)$, $\rho_j(S_j, T_j)$ (б), рассчитанные после коррекции соответствующими методами модельных СТД данных Mark-IIIС, полученных для $T_g(t)$ (17) при $\Delta z = 0.5$ м.

В работе предлагается учитывать выражение (9) непосредственно при определении профиля солёности. В этом случае уменьшение её динамической погрешности осуществляется методом градиентной коррекции солёности (ГКС):

$$S_{\Delta}(t) = S_m(t) + \beta^{-1} R_c C_m'(t) - \beta^{-1} \gamma R_t T_m'(t) \approx S_m(t) + K_{\Delta c} C_m'(t) - K_{\Delta t} T_m'(t), \quad (27)$$

где соответствующие коэффициенты $K_{\Delta c}$ и $K_{\Delta t}$ определяются по критерию $\min[\sigma S]$, табл. 1 и рис. 5а.

Таблица 1

Результаты обработки процедурой смещения (18), методами экспоненциальной (19), (20) и градиентной (25)-(27) коррекции, а также комбинированием температурных сигналов (21) модельных СТД данных Mark-IIIС, полученных для профиля $T_r(t)$ (17) при $\Delta z = 0.5$ м.

Способ коррекции	Профиль солёности	Ослабление $\sigma S_m / \sigma S$	Параметры коррекции	
			температуры	электропроводн.
Смещение (18)	S_{λ}	2	$\lambda_t = 0.12$ с	-
ЭО (19)	S_d	90	$R_{td} = 0.183$ с	
ЭС (20)	S_s	235		$R_{cs} = 0.184$ с
КТС (21)	S_n	450	$R_b = 0.166$ с	$R_{cs} = 0.03$ с -
ГК (25-26)	S_j	225	$k_{jt} = 1.1$	$k_{jc} = 1.81$
ГКТ (25)	S_{jt}	6	$k_{jt} = 0.74$	
ГКС (27)	S_{Δ}	225	$k_{\Delta t} = 1.1$	$k_{\Delta c} = 2.14$

Четвертая глава посвящена обработке СТД данных, полученных в реальных условиях с помощью измерительных систем высокого (раздел 4.1) и низкого (раздел 4.2) разрешения.

В разделах 4.1.1-4.1.5 анализируются данные зондирования, выполненного с помощью СТД Mark-IIIС в экспедиции ТОИ ДВО РАН в Японском море на станции №35 (рейс 37, НИС «Проф. Гагаринский», ноябрь 2003 г). Дается оценка параметров движения зонда в процессе измерения $V(t) \approx P_m'(t)$, рис. 6а. Электропроводность $C_m(t)$, измеренная ячейкой NB, а также значения температуры $T_r(t)$ и $T_m(t)$, полученные с помощью термистора и термометра, позволили определить два профиля солёности $S_m(t) = S(T_m, C_m, P_m)$ и $S_r(t) = S(T_r, C_m, P_m)$, рис. 7а. По СТД данным измеренным в верхнем и придонном квазиоднородных слоях установлены возможные уровни случайных погрешностей: $\Delta_c P_m \approx 0.4$ дбар, $\Delta_c T_m \approx 0.001^\circ\text{C}$, $\Delta_c T_r \approx 0.003^\circ\text{C}$, $\Delta_c C_m \approx 0.002 \text{ мСм/см}$

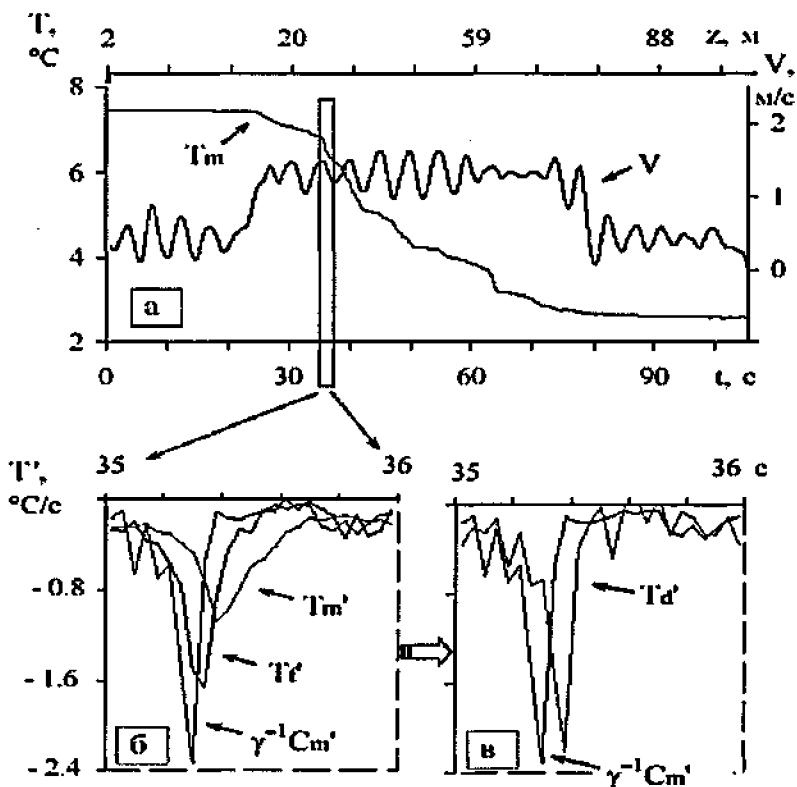


Рис. 6. Температура $T_m(t)$, измеренная платиновым термометром, и скорость движения СТД Mark-IIIС $V(t)$ (а) при зондировании на станции №35 (рейс 37, НИС «Проф. Гагаринский», ноябрь 2003 г). Производные $\gamma^{-1}C_m'(t)$, $T_m'(t)$ и $T_t'(t)$ (б), рассчитанные по СТД данным, а также $T_d'(t)$ и $\gamma^{-1}C_m'(t)$ (в), полученные методом ЭО (19) при $R_d=0.14$ с, на выделенном интервале измерения 35-36 с.

По профилям электропроводности $C_m(t)$, измеренной ячейкой NB, температуры $T_t(t)$ и $T_m(t)$, полученным с помощью термистора и термометра, рассчитываются два профиля солености $S_m(t)=S(T_m, C_m, P_m)$ и $S_t(t)=S(T_t, C_m, P_m)$, рис. 7а. По СТД данным измеренным в верхнем и придонном квазиоднородных слоях установлены возможные уровни случайных погрешностей: давления - $\Delta_c P_m \approx 0.4$ дбар, температуры - $\Delta_c T_m \approx 0.001^\circ\text{C}$, $\Delta_c T_t \approx 0.003^\circ\text{C}$, электропроводности - $\Delta_c C_m \approx 0.002$ мСм/см и солености - $\Delta_c S_m \approx 0.003\%$ (критерий $\Delta_c X_m \approx 2\sigma_X$). Оценивается также нелинейная систематическая

погрешность термистора, которая при измерениях в верхнем квазиоднородном слое составляла $\Delta_1 T \approx 0.01^\circ\text{C}$, а в придонном возросла до $\Delta_2 T \approx 0.02^\circ\text{C}$.

При сравнении профилей солености $S_m(t)$ и $S_d(t)$ в слое термоклина видно (рис. 7а), что уровень динамической погрешности $\Delta_d S_m(t)$ в 2 раза превышает $\Delta_d S_d(t)$. Следовательно, в течение зондирования инерционность термометра в 3-4 раза превосходила инерционную характеристику термистора.

Максимальный уровень динамической погрешности СТД измерения достигается на 36-й секунде зондирования (рис. 6а). На рис. 6б представлены производные $T_m'(t)$, $T_d'(t)$ и $\gamma^{-1} C_m'(t)$, рассчитанные на выделенном интервале измерения методом конечных разностей. В виду малости градиента солености в слое термоклина производная $\gamma^{-1} C_m'(t)$ фактически является градиентом температуры, рассчитанным по измеренной электропроводности. При сопоставлении этих профилей производных температуры наблюдается запаздывание характерных структурных элементов на $T_d'(t)$ и $T_m'(t)$ по отношению к $\gamma^{-1} C_m'(t)$ в среднем на $\lambda_T = 0.04$ и $\lambda_m = 0.12$ с соответственно. Значения экстремумов производных $T_d'(t)$ и $T_m'(t)$ различаются на 28 и 53% относительно $\gamma^{-1} C_m'(t)$.

Экспоненциальное обострение (ЭО) (19) профиля $T_m(t)$ при $R_{md} = 0.14$ с приводит к приближительному равенству экстремумов производных $\gamma^{-1} C_m'(t)$ и $T_d'(t)$, рис. 6в. Однако сохраняется запаздывание между этими структурными элементами на $\lambda_{md} = 0.08$ с. В результате ложные выбросы солености на профиле $S_{md}(t)$ недостаточно подавляются ($\sigma S_m / \sigma S_{md} \approx 3$) этим методом. При обострении профиля $T_d(t)$, измеренного термистором, также имеет место выравнивание амплитуд градиентов $\gamma^{-1} C_m(t)$ и $T_d'(t)$ при $R_d = 0.05$ с и характерный фазовый сдвиг $\lambda_R = 0.04$ с.

Сочетание процедуры смещения (18) и ЭО (19) приводит к значительному уменьшению псевдоструктуры на профилях $S_{fd}(t) = S(T_{fd}, C_m)$, $\sigma S_f / \sigma S_{fd} \approx 6$, и $S_{md}(t) = S(T_{md}, C_m)$, $\sigma S_m / \sigma S_{md} \approx 26$. Оптимальные комбинации $R + \lambda$ подбирались при выполнении критерия $\min[\sigma S]$.

В табл. 2 приведены найденные оптимальные параметры коррекции профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$ и отношения дисперсий солености до и после обработки каждым из перечисленных методов. Метод КТС+ЭС (21, 20) представлен в двух вариантах. В первом случае параметры фильтрации (20), $R_R = 0.073$ с и $R_S = 0.17$ с, определены

подбором по критерию $\min[\sigma S]$. Во втором случае эти параметры являются фиксированными, $R_B=0.14$ с и $R_{cs}=0.1$ с, содержатся в калибровочном файле и используются при обработке СТД данных Mark-III стандартной программой «CTD data Acquisition module». Ослабление псевдоструктуры солёности S_{mkA} при использовании второго варианта обработки в три раза меньше, чем в предложенном первом варианте коррекции СТД данных методом КТС+ЭС (S_{mk} , табл. 2).

Во многих прикладных задачах требуется точная оценка вертикального градиента температуры в слое скачка. В этом случае, преимущество имеют методы обострения температуры. Недостатком этих методов является появление высокочастотного шума на профилях солёности (S_{md} , $S_{m\Delta}$), обусловленного ростом в 2-4 раза случайной погрешности на профилях температуры $T_{md}(t)$ и $T_{m\Delta}(t)$. Этот недостаток устраняется фильтрацией профилей солёности с шириной окна $\Delta t=0.2$ с.

Таблица 2

Результаты коррекции СТД данных, полученных зондом Mark-III на станции №35 (рейс 37, НИС «Проф. Гагаринский»)

Способ коррекции	Профиль	$\sigma S_m/\sigma S$	Параметры коррекции		
			$T_m(t)$	$C_m(t)$	
Смещение (18)	$S_{m\lambda}$	10	$\lambda_t=.16$ с	-	-
С+ЭО (18, 19)	S_{md}	26	$\lambda_t=.08$ с	$R_{id}=.146$ с	-
С+ЭС (18, 20)	S_{ms}	42	$\lambda_t=.08$ с	-	$R_{cs}=0.148$ с
С+ГК (18, 25)	S_{nj}	21	$\lambda_t=.08$ с	$K_{jc}=.106$	$K_{jc}=-0.027$
С+ГКС(18, 27)	$S_{m\Delta}$	27	$\lambda_t=.04$ с	$K_{\Delta t}=.21$	$K_{\Delta c}=0.003$
КТС (21)	S_{mk}	40	-	$R_{fs}=.073$ с	$R_{cs}=0.17$ с
КТС (21)*	S_{mkA}	15	-	$R_B=.14$ с	$R_{cs}=0.1$ с

*Расчёт выполнен по стандартной программе «CTD data Acquisition module».

На рис. 76 представлены обработанные высокочастотным фильтром профили солёности $S_{\sigma\lambda}(t)$ и $S_{md}(t)$, рассчитанные после обострения $T_{\lambda}(t)$, измеренной термистором, и $T_m(t)$ – платиновым термометром. В слое термоклина профили $S_{\sigma\lambda}(t)$ и $S_{md}(t)$ имеют существенные отличия. На профиле $S_{md}(t)$ отмечаются локальные инверсии солёности, которые практически отсутствуют на $S_{\sigma\lambda}(t)$. Эти инверсии в рассматриваемом случае соответствуют вариациям скорости движения зонда $V(t)$,

рис. 76, и зависят от параметров качки судна. Установлено, что локальные инверсии солености «возникают» на фазе уменьшения скорости движения зонда в тонких температурных градиентных слоях. При этом величина ложной инверсии солености зависит как от градиента температуры, так и от амплитуды качки. Достичь полного устранения динамических погрешностей $\Delta_d T_m(t)$ в этих СТД данных перечисленными способами коррекции, в том числе методами (18, 19), не удастся.

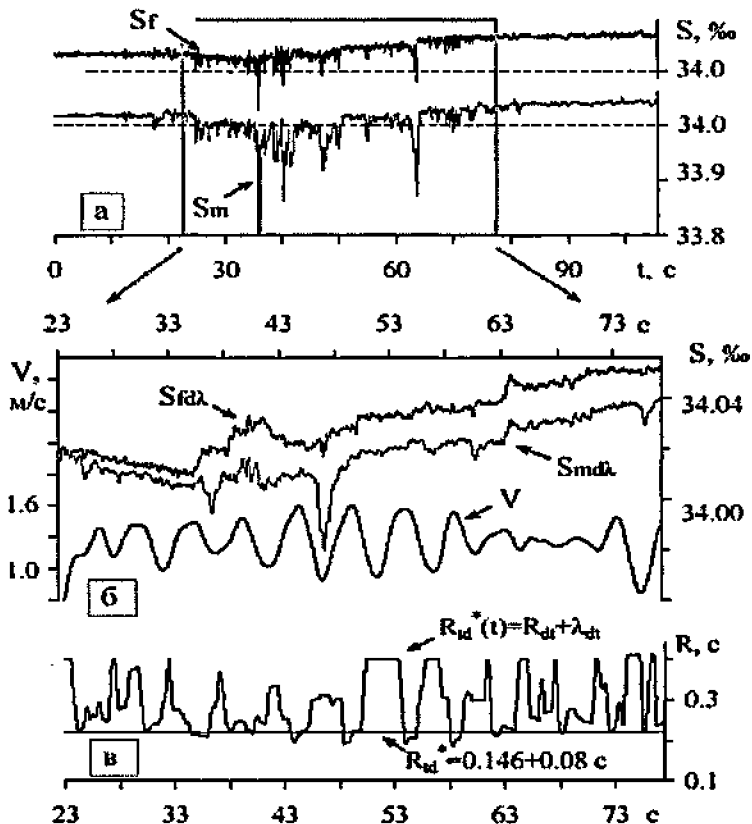


Рис. 7. Профили солености $S_m(t)$, $S_f(t)$ (а), рассчитанные по СТД данным зондирования №35, и $S_{mdl}(t)$, $S_{fdl}(t)$ (б), полученные коррекцией этих данных в термоклине при $R_{id}^* \approx 0.23 \text{ с}$ и $R_{\beta}^* = 0.1 \text{ с}$. График комбинированного параметра обострения $R_{id}^*(t)$ (в), рассчитанный для каждого момента времени с учетом $\min[\sigma S]$ при $\Delta t = 1 \text{ с}$. На рис. 76 профиль $S_{fdl}(t)$ смещен на величину -0.01‰ .

Было установлено, что на интервалах локальных инверсий солёности, значения параметра комбинированного обострения $R_{id}^*(t) = R_{md}(t) + \lambda_{md}$, определенного в процессе коррекции (18, 19) с учетом $\min[\sigma S]$, находятся в пределах от 0.3 до 0.5 с и более. В месте с тем, на интервалах локальных максимумов движения зонда ($\Delta t_{Vmax} \approx 1.5$ с) величина этого параметра не превышает 0.25 с. Предполагается, что причиной высокой рассогласованности показаний термометра и ячейки NB на интервалах $V(t) \leq V_{сред}$ является неустойчивость режима обтекания датчиков на фазе уменьшения скорости движения зонда, обусловленной качкой судна.

Таким образом, при обработке С и Т профилей методом комбинированного обострения (18, 19) выделяются интервалы, на которых имеет место нестандартная рассогласованность STD данных $R_t^*(t) \geq R_{t_{сред}}^*$, связанная с неравномерностью движения прибора. При определении искомого профиля солёности на этих чередующихся интервалах (рис. 7в) предлагается применять методы интерполяции, в том числе линейной (профиль $S_{mdl}(t)$ на рис. 8).

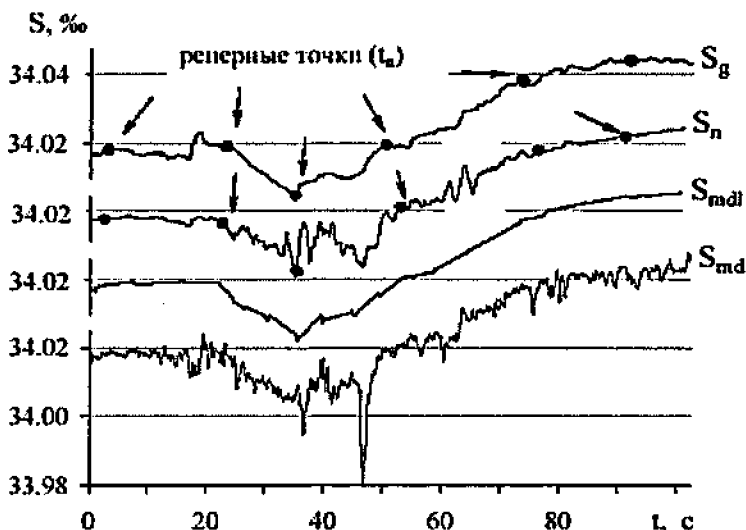


Рис. 8. Профиль солёности: $S_{mdl}(t)$, рассчитанный методом ЭО (18, 19), и $S_{mdl}(t)$ - вариант коррекции $S_{md}(t)$ с помощью линейной интерполяции на интервалах $t \in [t_L, t_{L+1}]$, которые соответствуют условию $R_t^*(t) \geq R_{t_{сред}}^*$, а также $S_n(t)$ - результат ТСС-метода (22), и $S_g(t)$ - метода ГИ (23-24). Станция № 35.

На рис. 8 также представлены профили солености $S_n(C_m, T_n)$ и $S_g(C_m, T_g)$, полученные с помощью ТСС-метода (22) и метода градиентной интерполяции (ГИ, 23-24). На этих профилях отмечаются не устраненные полностью элементы ложной структуры солености. Кроме того, что при использовании методов ГИ и ТСС выбор реперных точек t_n осуществлялся экспертным способом.

При анализе совокупности СТД наблюдений получена зависимость параметра экспоненциального обострения $R_t^*(V)$ измеренной температуры от скорости движения зонда Mark-IIIС (V). Выделенные значения параметра $R_{td}^* = R_{md} + \lambda_{md}$ соответствовали интервалам данных со стандартной СТ-рассогласованностью. На интервале скорости $0.4 \leq V \leq 1.6$ м/с зависимость $R_t^*(V)$ аппроксимируется линейной функцией $R_t^*(V) \approx 0.36 \cdot V/10$. Найденная зависимость заметно отличается от оценки инерционной характеристики $R_t(V)$ (4), полученной при анализе результатов лабораторных экспериментов с платиновыми термометрами. Это отличие, по-видимому, обусловлено влиянием корпуса зонда и защитного экрана платинового термометра на режим обтекания и показания этого датчика.

В разделе 4.3 рассматриваются модифицированные методы коррекции СТД профилей в приложении к данным зондов низкого разрешения. Обрабатываются данные, полученные с помощью зондов серии STD (японской фирмы Union Engineering). Модели STD-200 и STD-1000 имеют заданную дискретность регистрации данных по глубине с интервалами 0.2 м и 1 м, соответственно. Точность измеряемых параметров морской среды находится в пределах: $\pm 0.05^\circ\text{C}$, ± 0.05 мСм/см и ± 0.24 м.

При динамической коррекции натуральных данных получены оценки инерционных коэффициентов платиновых термометров, которые отличаются в 2-3 раза от указанных в технических описаниях к зондам STD. Показано, что методы экспоненциального обострения температурных профилей не позволяют выделить сдвиговые ($V\lambda_{md}$) и экспоненциальные (VR_{md}) параметры коррекции из-за низкого разрешения данных измерений зондами STD-200 и STD-1000. Для обработки этих профилей предпочтительным является метод градиентной коррекции.

В Заключении приводятся основные результаты исследования.

1. Дана физическая интерпретация лабораторных экспериментов, в которых определялись динамические характеристики преобразователей СТД зондов (Смирнов, 1990; Gregg, 1980, 1982). Установлены новые функциональные зависимости инерционных коэффициентов СТД датчиков от режима их обтекания и скорости набегающего потока жидкости.
2. На основе анализа частотных характеристик датчиков зонда выявлены характерные особенности псевдоструктуры солёности, обусловленные динамическими погрешностями СТД измерения.
3. С помощью предложенной модели процесса СТД измерения показаны преимущества и недостатки методов сдвиговой, экспоненциальной и градиентной коррекции, а также методов комбинирования температурного профиля.
4. Из анализа СТД данных зонда Mark-III получено подтверждение нелинейного характера переходных процессов в термодатчиках, которые могут быть представлены инерционным звеном 1-го порядка с запаздыванием.
5. Усовершенствован комбинированный метод оценки динамической погрешности и обработки СТД данных высокого разрешения. Метод включает экспоненциальное обострение температуры и электропроводности в сочетании с процедурой смещения температурного профиля. Для определения параметров обострения используется критерий минимума дисперсии вариаций солёности.
6. Получена зависимость инерционности платинового термометра сопротивления от скорости движения зонда Mark-III по натурным СТД данным.
7. Показано, что метод градиентной коррекции наиболее эффективен при обработке СТД данных низкого разрешения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Навроцкий В.В., Лазарюк А.Ю., Малышев А.А. Особенности структуры гидрофизических характеристик и внутренних волн вблизи границы шельфа // ДАН СССР. 1989. Т. 309. № 1. С. 187-191.
2. Гончаренко И.А., Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И., Федеряков В.Г. Тематическая обработка данных AVHRR на примере изучения прибрежного апвеллинга // Исследование Земли из космоса. 1993. № 2. С. 97-107.

3. Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И., Салюк А.Н. Согласование профилей температуры и электропроводности, измеренных с помощью CTD-зондов типа MARK-III. Устранение ложной структуры солёности // Препринт. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2002. 34 с.
4. Lazaryuk A.Yu., Ponomarev V.I. Methods for the reduction of salinity spiking in oceanographic CTD data // Proceedings of the International Conference on the Arctic and North Pacific. «Bridges of science between North America and Russian Far East», Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 33.
5. Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И. Метод градиентной коррекции профилей температуры, электропроводности и солёности, измеренных в океане // Тезисы докладов 13-ой международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях». Июнь 20-23, 2005. Москва. Россия. С. 68-70.
6. Lazaryuk A.Yu. and Ponomarev V.I. Salinity spikes and gradient correction method // Pacific Oceanography. 2005. V. 3, N 1, P. 55-62.
7. Lazaryuk A.Yu. and Ponomarev V.I. The gradient correction method for data processing of temperature, conductivity, salinity measured in the ocean // Proceedings of 1st IC-EpsMsO 6-9 July, 2005. Patras, Greece. Vol. III. P. 999-1007.
8. Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И. Динамические погрешности в данных СТД измерений // Тезисы докладов конференции «Гидрометеорология Дальнего Востока и окранных морей Тихого океана». 2005. Вл-сток. Россия. С. 31-33.
9. Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И., Хен Г.В. Методы устранения динамической погрешности косвенного измерения солёности в данных СТД зондирований. // Тезисы докладов конференции «Гидрометеорология Дальнего Востока и окранных морей Тихого океана». 2005. Владивосток. Россия. С. 34-37.
10. Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И. Устранение динамических погрешностей данных СТД измерения в океане // Вестник ДВО РАН. 2006. №4. С. 106-111.

Лазарюк Александр Юрьевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ В ОКЕАНЕ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 25.10.2006

Формат 60X84/16

Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз. Заказ 67

Отпечатано в ОНТИ ТОИ ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

