

вании верхней притопленной плавучести, которая становится громоздкой. Установка габаритной и тяжелой буйковой системы невозможна с маломерных плавсредств, имеющих лебедки и кран-балки грузоподъемностью, ограниченной 200-300 кг. Поэтому на глубоководных постановках в качестве буйрепа целесообразно использовать кевларовый трос, на котором, однако, не будет работать индуктивный модем. Подходящей заменой последнему служит гидроакустический модем. Гидроакустический канал связи также незаменим при эксплуатации обсерватории под ледовым покровом.

Включение гидроакустического модема в состав обсерватории позволит расширить область применения и улучшить функциональные характеристики системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобковский Л.И., Зацепин А.Г., Ковачев С.А., Копелевич О.В., Островский А.Г., Розман Б.Я., Флинт М.В. Использование морских буровых платформ в качестве технологических носителей в системе комплексного многоуровневого мониторинга морской среды // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 8.
2. Лобковский Л.И., Зацепин А.Г., Ковачев С.А., Копелевич О.В., Островский А.Г., Флинт М.В., Моныхов С. Технология многоуровневого экологического мониторинга в целях информационного обеспечения безопасности морской добычи нефти и газа // Технологии ТЭК. 2007. № 2.
3. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Деревнин В.А., Низов С.С., Поярков С.Г., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Заякоренная автоматическая измерительная система «Аквазонд» для вертикального профилирования морской среды // Океанология. 2008. Т. 48, № 2.

УДК 551.46.08

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ STD-ДАННЫХ

А.Ю. Лазарюк

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹

Обсуждается влияние инерционных характеристик датчиков STD-зонда и параметров стратификации морской среды на погрешности определения её температуры, электропроводности и солёности. Описание этих погрешностей дано в рамках линейной модели измерительного процесса. Рассмотрены критерии и методы динамической коррекции STD-данных.

Анализируются результаты натурального эксперимента, выполненного STD-зондом Mark-IIIС. Показано, что инерционность термодатчиков зонда соответствует схеме «экспоненциальный фильтр + смещение». Метод коррекции STD-данных, основанный на этой схеме, позволяет существенно уменьшить уровень динамической погрешности при расчёте солёности. Однако неблагоприятные условия натурального эксперимента (качка и дрейф судна) понижают эффективность предложенного метода.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении натуральных наблюдений в океане широко используются зондирующие STD-комплексы, регистрирующие несколько гидрологических характеристик, в частности, электропроводность (*Conductivity*), температуру (*Temperature*) и давление (или глубину, *Depth*). Однако эксплуатация этих приборов с борта дрейфующего судна не обеспечивает заявленной точности измеряемых величин. На качество STD-данных оказывают влияние методические погрешности измерения, определяемые сложными условиями проведения натурального эксперимента [1], и инструментальные, обусловленные характеристиками зонда и стратификацией морской среды [2-6].

Из инструментальных погрешностей – систематических, случайных и динамических – именно последние подверже-

ны наибольшим изменениям в процессе STD-зондирования. Их уровень зависит от стратификации слоя морской воды, инерционности первичных преобразователей (датчиков) зонда и скорости его движения.

В 60-80-е годы различными группами исследователей подробно изучалось влияние скорости перемещения (*V*) прибора в водной среде на инерционные характеристики датчиков электропроводности $R_c(V)$ и температуры $R_t(V)$. Эксперименты с первыми серийными STD-зондами показали значительные расхождения (до нескольких секунд) между величинами постоянных времени (*Response time*) их датчиков. У современных STD-комплексов благодаря совершенствованию технологии изготовления чувствительных элементов первичных преобразователей пределы

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел: (4232) 311400, e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru

рассогласованности характеристик $R_c(V)$ и $R_t(V)$ уменьшены на порядок и более [2, 4, 6].

В настоящей работе при анализе динамических погрешностей *CTD*-данных используются функциональные зависимости $R_c(V)$ и $R_t(V)$, которые были получены в [1] обобщением результатов экспериментов [3, 7] в рамках теории пограничного слоя.

Наиболее высоки уровни динамических погрешностей в *CTD*-измерениях, которые выполнены в слоях сезонного термоклина, где на интервалы тонких градиентных прослоек приходится их максимумы. Потеря точности измерения температуры и электропроводности стратифицированной водной массы приобретает особую значимость при определении её косвенных характеристик: солёности (S) и плотности (ρ). Значения параметров S и ρ рассчитываются по *CTD*-данным с помощью эмпирических формул. Из-за высоких уровней динамических погрешностей сложно определять солёность и плотность с высокой точностью без предварительной обработки данных *CTD*-зондирования. При расчете профиля S в температурном градиентном слое, как правило, возникает ложная структура (псевдоструктура) солёности за счет динамической рассогласованности инерционных характеристик датчиков электропроводности и температуры. Пространственный масштаб ложной структуры соответствует толщине слоя скачка температуры. В тонких температурных градиентных прослойках псевдоструктура солёности имеет вид ложных экстремумов (salinity spikes) [5, 6].

При описании влияния параметров стратификации морской среды на динамические погрешности *CTD*-данных применяются стандартные допущения. В частности, представление

исследуемых гидрофизических полей в спектральном виде позволяет использовать известные методы радиотехники, а учёт малости линейных размеров датчиков зонда по отношению к масштабам стратификации водной среды – рассматривать эти измерители как точечные. В этом случае их частотные функции соответствуют характеристикам линейных преобразователей с сосредоточенными параметрами [10].

Способам устранения динамической рассогласованности *CTD*-данных посвящены многочисленные работы. Выделяются два основных подхода в решении этой проблемы: инженерно-технологический и математический. При первом разработчики нацелены на совершенствование элементной базы средств измерения (миниатюризация чувствительных элементов, двойные комплекты датчиков ...), а также вспомогательных средств (автономные носители, кран-балки и лебёдки с положительной обратной связью) [4]. Второй подход предполагает развитие методов численной обработки исходных данных *CTD*-измерений.

Различные методы коррекции *CTD*-данных были обобщены и представлены в отчёте рабочей группы SCOR [10]. В настоящей работе обсуждаются только два метода обработки, которые соответствуют линейной модели измерительного процесса.

CTD-зонды Mark-III, разработанные под руководством Нейла Брауна в середине 70-х годов и усовершенствованные в 80-х, до сих пор рассматриваются многими океанографами как эталонные. Предпочтения основаны прежде всего на высоких метрологических характеристиках этих приборов (стабильности, малой инерционности и миниатюрности датчиков, высоким разрешением) [2].

Модель *CTD*-комплекса Mark-IIIС (пр-во General Oceanics, США) активно используется с 1994 года при проведении гидрологических работ в экспедициях Тихоокеанского Океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ТОИ ДВО РАН). Это обстоятельство также повлияло на выбор в качестве объекта исследования инерционных характеристик датчиков и натуральных *CTD*-данных именно этого зонда.

■ Динамическая рассогласованность *CTD*-данных

Влияние динамических погрешностей при измерении электропроводности $C_m(t)$ и температуры $T_m(t)$ в каждый момент времени t в стратифицированном слое морской воды $T_r(t) \neq \text{const}$ и $C_r(t) \neq \text{const}$ (в отсутствие систематических и случайных погрешностей) описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} T_r(t) &= T_m(t) + R_t(t) \cdot T_m'(t) \\ C_r(t) &= C_m(t) + R_c(t) \cdot C_m'(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $T_m'(t)$, $C_m'(t)$ – производные, а $R_t(t)$ и $R_c(t)$ – инерционные коэффициенты датчиков зонда [10]. Величины этих коэффициентов зависят от свойств материала чувствительных элементов и от динамических параметров омывающего потока, его скорости (V) и числа Рейнольдса. При потоках омывающей жидкости: ламинарном (когда скорость не достигает критических величин, $V < V^{cr}$) и турбулентном ($V \geq V^{cr}$) вариации инерционных коэффициентов оцениваются выражениями:

$$\begin{aligned} R_t(V < V_t^{cr}) &\approx K_t + K_{tL} \cdot V^{0.5} \text{ и} \\ R_t(V \geq V_t^{cr}) &\approx K_{tT}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_c(V < V_c^{cr}) &\approx K_{cL} \cdot V^{1.5} \text{ и} \\ R_c(V \geq V_c^{cr}) &\approx K_{cT} \cdot V^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где K_t, K_{cl}, K_{ct} и K_{cl}, K_{ct} – константы термометра и датчика электропроводности при соответствующих режимах обтекания [1].

Для большинства CTD-зондов рекомендованная скорость движения прибора составляет от 0,5 до 1 м/с. В этом динамическом диапазоне инерционность серийных термометров находится в пределах от 1 до 0,1 с, а измерителей электропроводности менее 0,1 с, т.е. $R_t \gg R_c$ [2, 6]. Скорости, при которых изменяются режимы обтекания основных датчиков, также не совпадают ($V_t^{cr} \neq V_c^{cr}$) из-за их конструкционных различий.

На рис. 1 представлены графики инерционных характеристик основных датчиков зонда Mark-III. Функции $R_c(V < V_c^{cr}) \approx 0,026 \cdot V^{-1,5}$ и $R_c(V \geq V_c^{cr}) \approx 0,026 \cdot V^{-1}$ при $V_c^{cr} = 1$ м/с определены по результатам лабораторного эксперимента с ячейкой проводимости Neil Brown (NB) [7]. Данные подобного эксперимента с термометром Rosemount отсутствуют в открытой печати, и представленная характеристика $R_t(V < V_t^{cr}) \approx 0,08 + 0,13 \cdot V^{-0,5}$ и $R_t(V \geq V_t^{cr}) \approx 0,25$ с является оценочной. При оценке учитывался коэффициент инерционности этого термометра, указанный в описании зонда Mark-IIIС, $R_t \approx 0,25$ с при скорости зондирования 1 м/с [8]. Принимая во внимание геометрические размеры термометра (трубка диаметром $d \approx 2$ мм и длиной $l \approx 50$ мм), изменение режима омывающего потока при его поперечной ориентации возможно при $V_t^{cr} \approx 0,5$ м/с ($Re^{cr} \approx 10^3$). Коэффициенты функции $R_t(V)$ при ламинарном режиме обтекания оценены с учетом результатов лабораторных экспериментов с платиновым термометром гидрологического зонда ИСТОК [3]. Чувствительные элементы этих термометров имеют

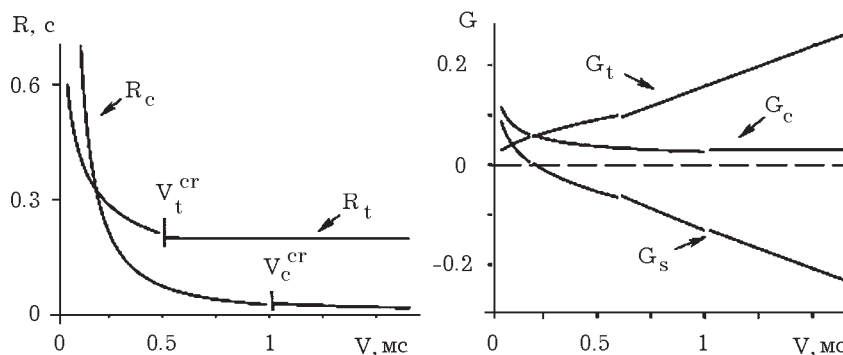


Рис. 1. Инерционные характеристики датчиков зонда Mark-IIIС: ячейки проводимости Neil Brown, $R_c(V)$, платинового термометра Rosemount, $R_t(V)$ при различных скоростях омывающего потока $V = const$. И соответствующие этим характеристикам относительные величины динамических погрешностей измеренных величин температуры $G_t(V)$, электропроводности $G_c(V)$, а также рассчитанной солёности $G_s(V)$ в слое морской воды с параметрами: $Y \approx B \approx 1, S_r(z) = const, T_r(z) = const$

схожие конструкции и незначительные отличия в характеристиках используемых материалов.

Зависимость электропроводности морской воды $C(S, T, P)$ на малых интервалах изменчивости температуры, солёности и давления (P) соответствует линейной функции:

$$C_r(t) = C_0 + B \cdot S_r(t) + Y \cdot T_r(t) + E \cdot P_r(t). \quad (4)$$

При параметрах морской воды, характерных для верхнего двухсотметрового слоя океана, $P \leq 200$ дбар, $T = 4 \div 20^\circ C$, $S = 30 \div 35$ psu и $C = 30 \div 45$ мСм/см значения ко-

эффициентов $Y(T, S) = \left(\frac{\partial C}{\partial T} \right)_{S, P}$ и

$B(T, S) = \left(\frac{\partial C}{\partial S} \right)_{T, P}$ находятся в рав-

ных пределах $0,8 \leq Y \leq 1,3 \frac{мСм}{см \cdot ^\circ C}$ и

$0,8 \leq B \leq 1,3 \frac{мСм}{см \cdot psu}$, а $E(T, S) =$

$$= \left(\frac{\partial C}{\partial P} \right)_{S, T} \approx 0,02 \frac{мСм}{см \cdot дбар}.$$

Вариации электропроводности в стратифицированных слоях морской воды в большинстве случаев вызваны градиентом температуры. Поэтому динамические погрешности

CTD-данных обладают высоким уровнем корреляции (т.к. $\Delta_d T_m$ и $\Delta_d C_m$ – функции скорости движения прибора и градиента температуры), и оценивать динамическую погрешность при расчёте солёности следует с помощью выражения:

$$\begin{aligned} \Delta_d S_m(t) &= S_r(t) - S_m(t) \approx \\ &\approx B^{-1} \cdot R_c(t) \cdot C_m'(t) - \\ &- Y \cdot B^{-1} \cdot R_t(t) \cdot T_m'(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Для простоты рассмотрим слой морской воды, равномерно стратифицированный по температуре $T_r(z) = const$, но однородный по солёности $S_r'(z) = 0$, в котором коэффициенты приблизительно равны $Y \approx B \approx 1$. Представленные на рис. 1 графики относительных величин динамических погрешностей электропроводности $G_c(V) = \Delta_d C_m / [Y \cdot T_r']$ и температуры $G_t(V) = \Delta_d T_m / T_r'$, измеренных в этом слое датчиками зонда Mark-III, демонстрируют равенство $G_c = G_t \approx 0,06$ при скорости движения прибора $V \approx 0,2$ м/с. В этом случае рассчитанная солёность не содержит динамической погрешности (см. график $G_s(V) = \Delta_d S_m / [Y \cdot B^{-1} \cdot T_r']$, рис. 1). По мере увеличения скорости омывающего потока функция $G_c(V)$ стремится к минимальной предельной величине, в то

же время значения погрешности $G_t(V)$ непрерывно возрастают. В результате при зондировании с рекомендованной скоростью $V \approx 1$ м/с профили измеренных параметров оказываются динамически рассогласованными в температурных градиентных слоях, а рассчитанные значения солености заниженными относительно реальных. Такие искажения на профиле $S_m(t)$ имеют вид ложных выбросов, которые по величине могут превосходить характерные изменения солености в этих слоях.

На динамическую рассогласованность *CTD*-данных оказывает влияние и вертикальная структура измеряемых параметров. Представим вертикальное распределение температуры в слое морской воды гармонической функцией:

$$T_r(z) = T_0 + T_A \cdot \exp[i \cdot 2\pi \cdot z / Z], \quad (6)$$

где $i = \sqrt{-1}$, $Z = \text{const}$ – параметр пространственного масштаба температурных вариаций, $T_A = \text{const}$ – амплитуда этих вариаций относительно средней величины $T_0 = \text{const}$. Соленостная стратификация в исследуемом слое отсутствует, $S_r(z) = S_0$.

Если прибор перемещается с постоянной скоростью и вертикальный масштаб температурных вариаций (6) значительно превосходит линейные размеры датчиков зонда ($Z \gg d$, $Z \gg l$), то частотные функции термометра и ячейки проводимости соответствуют характеристике линейного преобразователя с сосредоточенными параметрами:

$$W(i\Omega) = [1 + i\Omega \cdot R]^{-1}, \quad (7)$$

где $\Omega = 2\pi \cdot V / Z$ – частота. В этом случае измеренные профили можно представить в виде:

$$T_m(t) = W_t \cdot T_r(t) = T_0 + T_A \cdot A_t \cdot \exp[i\Omega \cdot t + iF_t], \quad (8)$$

$$C_m(t) = C_0 + Y \cdot T_A \cdot A_c \cdot \exp[i\Omega \cdot t + iF_c] + E \cdot P_r(t), \quad (9)$$

где $A_c = [1 + (\Omega \cdot R_c)^2]^{-0.5}$, $A_t = [1 + (\Omega \cdot R_t)^2]^{-0.5}$ и $F_c = -\arctg(\Omega \cdot R_c)$, $F_t = -\arctg(\Omega \cdot R_t)$ – амплитудные и фазовые частотные функции соответствующих датчиков.

При отсутствии равенства инерционных коэффициентов, $R_t \neq R_c$, структуры измеренных профилей $C_m(t)$ и $T_m(t)$ рассогласованы по амплитудам, $A_t \neq A_c$, и фазам, $F_t \neq F_c$. Рассогласованность *CTD*-данных при расчете профиля $S_m(t)$ создаёт псевдоструктуру солености (ПСС) в пределах градиентного слоя температуры:

$$\Delta_d S_m(t) = B^{-1} \cdot Y \cdot T_A \cdot \{1 - A_t / A_c \cdot \exp[iF_t - iF_c]\} \cdot A_c \cdot \exp[i\Omega \cdot t + iF_c]. \quad (10)$$

Стратификация морских водных масс имеет, как правило, ступенчатый вид, когда наблюдается чередование квазиоднородных слоев (КС) и градиентных прослоек (ГП). Параметры пространственного масштаба (Z) и амплитуды вариаций (T_A и S_A) измеряемых характеристик морской воды оцениваются константами в пределах слоя (прослойки). В однородных слоях параметр $Z \rightarrow \infty$ и согласно (10) при расчёте профиля солености отсутствуют ложные вариации на соответствующих интервалах

измерения. В градиентных прослойках, толщина которых Δz , масштабный параметр оценивается величиной $Z \approx 2\Delta z$.

Инерционные коэффициенты большинства *CTD*-зондов характеризуются неравенством $R_t \gg R_c$ при рекомендованных скоростях зондирования. Если *CTD*-данные получены в прослойке, толщина которой $\Delta z \leq \Delta z_c$, где $\Delta z_c = 10V \cdot R_c$ и соответствует $A_c(\Delta z_c) \approx 0,95$, то ложная структура солености (10) определяется рассогласованностью амплитудных частотных функций, $A_t / A_c \ll 1$. При толщине градиентного слоя $\Delta z \geq \Delta z_t$, где $\Delta z_t = 10V \cdot R_t$ и $A_t(\Delta z_t) \approx 0,95$, отношение $A_t / A_c \approx 1$ и ПСС определяется рассогласованностью фазовых частотных функций, $F_t - F_c$. Между структурами профилей температуры $T_m(t)$ и электропроводности $C_m(t)$ имеет место фазовое смещение $\Delta\Phi_{tc} = \Omega^{-1} [F_t - F_c]$, по величине приблизительно равное разности инерционных констант $\Delta\Phi_{tc} \approx R_t - R_c$. Измерение градиентной структуры с толщиной слоя $\Delta z_c < \Delta z < \Delta z_t$ приводит к ложным вариациям на профиле рассчитанной солености, которые обусловлены рассогласованностью как амплитудных $A_t / A_c < 1$, так и фазовых $\Delta\Phi_{tc} < R_t - R_c$ частотных функций.

Для ячейки NB и термометра Rosemount характерные

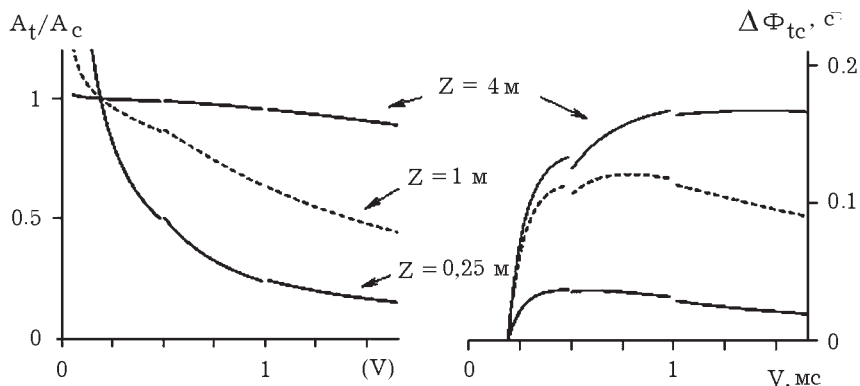


Рис. 2. Отношение амплитудных A_t/A_c и фазовых $\Delta\Phi_{tc} = Z \cdot [F_t - F_c] / [2\pi \cdot V]$ частотных функций платинового термометра и ячейки проводимости зонда Mark-III при различных скоростях движения $V = \text{const}$. Расчет выполнен с учетом зависимостей $R_t(V)$ и $R_c(V)$ (рис. 1) для температурных вариаций вида (6) при пространственных масштабах $Z = \{0,25; 1; 4 \text{ м}\}$

толщины температурных прослоек оцениваются величинами $\Delta z_c \approx 0,3$ м и $\Delta z_i \approx 2,5$ м при скорости зондирования $V=1$ м/с. На рис. 2 представлены графики отношения амплитудных A_i/A_c и фазовых $\Delta\Phi_{tc}$ частотных функций этих датчиков, рассчитанные по $R_i(V)$ и $R_c(V)$ (рис. 1) для трех пространственных масштабов температурных вариаций $Z=\{0,25; 1; 4$ м}. Эти графики иллюстрируют рассмотренные случаи рассогласованности измеренных параметров.

■ Моделирование процесса CTD-измерения

Рассмотрим модельный прибор, который перемещается в морской среде с постоянной скоростью и обладает техническими параметрами зонда Mark-IIIС. Датчики зонда опрашиваются с частотой 25 Гц, их инерционные характеристики соответствуют графикам $R_i(V)$ и $R_c(V)$ рис. 1.

Инерционные эффекты, возникающие в процессе измерения параметров морской воды датчиками зонда, описываются соотношениями (1). Если в начальный момент времени t_0 CTD-данные получены в квазиоднородном слое $C_m(t_0)=C_r(t_0)$, $T_m(t_0)=T_r(t_0)$ и последующие измерения выполнены при постоянной скорости $V=const$, то решениями уравнений (1) являются экспоненциальные высокочастотные фильтры:

$$T_m(t) = \exp[-\delta t/R_i] \cdot T_m(t-\delta t) + \{1 - \exp[-\delta t/R_i]\} \cdot T_r(t), \quad (11)$$

$$C_m(t) = \exp[-\delta t/R_c] \cdot C_m(t-\delta t) + \{1 - \exp[-\delta t/R_c]\} \cdot C_r(t), \quad (12)$$

где δt – временной интервал опроса датчиков. Далее полагаем, что исследуемый модельный слой морской воды, расположенный между горизонтами z_0 и z_b , однороден по солености,

$S_r(z)=S_0$, но стратифицирован по температуре. Вертикальный температурный профиль представим функцией:

$$T_r(z) = T_0 = const, \quad \text{в верхнем КС } z \in (z_0; z_1), \quad (13)$$

$$T_r(z) = T_0 - 0,5 \cdot T_A \cdot \{1 - \cos[2\pi \cdot (z - z_1)/Z]\}, \quad \text{в градиентном слое } z \in (z_1; z_2), \quad (14)$$

$$T_r(z) = T_0 - T_A = const, \quad \text{в нижнем КС } z \in (z_2; z_b). \quad (15)$$

Константам присвоим значения: $T_0=4,5^\circ\text{C}$, $T_A=0,5^\circ\text{C}$; $Z=1$ м и $S_0=33$ psu. Скорость зондирования $V=1$ м/с. В этом случае легко переходить от зависимости $T(z)$ к зависимости $T(t)$. Благодаря заданной однородной стратификации по солености вариации на профиле электропроводности зависят только от температурной функции. Поэтому вместо пары $T_m(t), C_m(t)$ рассмотрим профили $T_c(t) = Y^{-1}[C_m(t) - C_0 - E \cdot P(t)]$ и $T_m(t)$. Пара $T_m(t), T_c(t)$, представленная на рис. 3, рассчитывалась по формуле (11) при

заданном реальном профиле $T_r(z)$ (13-15), $Z=1$ м и инерционных коэффициентах $R_i=0,25$ с, $R_c=0,03$ с.

Рассматриваемый вариант соотношения пространственного масштаба исследуемой термической структуры и инерционных коэффициентов датчиков зонда относится к случаю $\Delta z_c < \Delta z < \Delta z_i$, когда $\Phi_c \rightarrow R_c$, $A_c \rightarrow 1$ и $A_c > A_i$. Поэтому профиль $T_c(t)$ практически не отличается от исходного распределения $T_r(t)$ из-за малости параметра сглаживания $R_c \leq \delta t$. В то же время структура $T_m(t)$ (показания платинового термометра) характеризуется не только уменьшением на 30% величины максимума производной, его смещением на два такта к нижней границе слоя скачка, но и двукратным увеличением толщины этого слоя. Таким образом, CTD-данные, измеренные зондом Mark при скорости 1 м/с и толщине температурной прослойки $\Delta z=0,5$ м, рассогласованы по фазам $\Delta\Phi_{tc} \approx 2 \cdot \delta t = 0,08$ с, амплитудам $\max[T_m'(t)]/\max[Y^{-1}C_m'(t)] \approx 0,7$

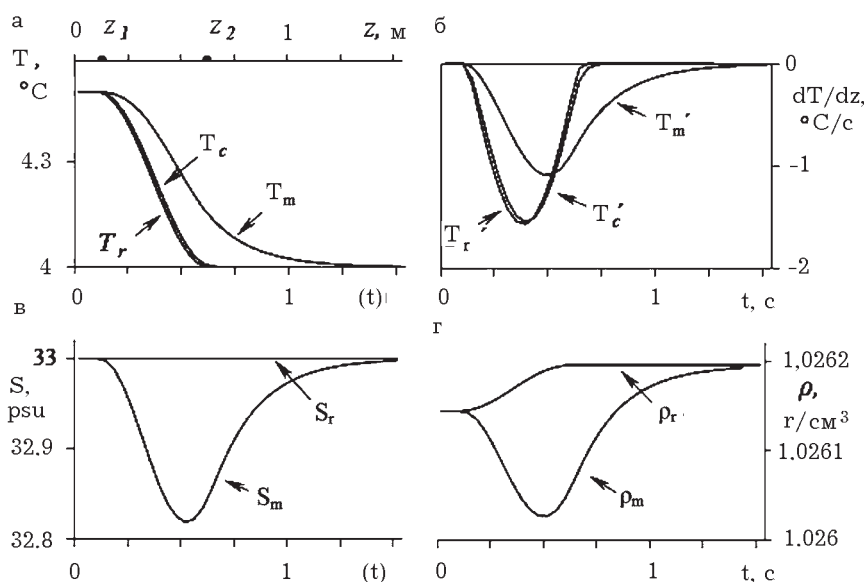


Рис. 3. Профили температуры (а), градиента температуры (б), солености (в) и плотности (г), соответствующие заданным распределениям: $T_r(z)$ (13-15) при $Z=1$ м, $S_r(z)=33$ psu, $\rho_r(S_r, T_r)$, а также модельные CTD-данные: $T_m(t), T_c(t) = Y^{-1}[C_m(t) - C_0 - E \cdot P(t)]$ и их производные $T_m'(t), T_c'(t), S_m(C_m, T_m), \rho_m(S_m, T_m)$, рассчитанные с помощью фильтра (11) при $V=1$ м/с, $R_i=0,25$ с и $R_c=0,03$ с

и вертикальным масштабам измеренных слоёв $V \cdot \Delta t_m \approx 2 \cdot V \cdot \Delta t_c$.

На конкретном модельном примере выявленные расхождения в структурах профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$ при расчете $S_m(t) = S(C_m, T_m)$ приводят к уменьшению величин солёности до 0,18 psu в пределах градиентного слоя измеренной температуры (рис. 3, в). Далее при определении величин плотности $\rho_m(t) = \rho(S_m, T_m)$ также наблюдается ложный минимум, который показан на рис. 3, г. Псевдоструктурные отклонения на профиле $\rho_m(t)$ достигают значения $0,15 \cdot 10^{-3}$ г/см³, а плотностной градиентный слой оказывается смещенным на $\Delta t_p \approx 0,6$ с (или 0,6 м) «по ходу движения зонда».

Критерии рассогласованности CTD-данных и методы её устранения

Функция взаимной корреляции производных измеренных параметров

$$\Psi_{CT}(\zeta, \Delta t) = \frac{1}{t_b - t_0} \int_{t_0}^{t_b} \{ C'_m(t) \cdot T'_m(t + \zeta) \} dt \quad (16)$$

позволяет определить фазовую рассогласованность CTD-данных на интервале зондирования $[t_0; t_b]$, который включает температурную градиентную прослойку. Здесь параметр смещения ζ кратен временному интервалу опроса датчиков $\zeta = n \delta t$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Если в пределах исследуемой прослойки исходный профиль $T_r(z)$ содержит гармоническую компоненту (6) и предполагаемый градиент солёности мал по сравнению с величиной параметра температурной стратификации, т.е. выполняется условие:

$$B \cdot S_r(z) \ll Y \cdot T_r'(z), \quad (17)$$

то, учитывая (7) и (8), функция (16) оценивается выражением:

$$\Psi_{CT}(\zeta, \Delta t) \approx K_\Psi \cdot \exp\{i \cdot \Omega \cdot [\zeta - \Delta \Phi_{tc}]\}. \quad (18)$$

При фиксированных параметрах T_A, R_t, R_c и Δt коэффициент

$$K_\Psi(T_A, R_t, R_c, \Delta t) \approx \text{const}$$

и действительная часть функции $\Psi_{CT}(\zeta)$ максимальна, когда значение параметра ζ совпадает с величиной $\Delta \Phi_{tc}$:

$$\zeta_M \approx \Phi_t - \Phi_c = \Omega^{-1} [\arctg(\Omega \cdot R_t) - \arctg(\Omega \cdot R_c)]. \quad (19)$$

Следовательно, динамическая рассогласованность измеренных параметров морской воды выявляется при корреляционном анализе только CTD-данных высокого разрешения, $\delta t < \Delta \Phi_{tc}$, которые получены в температурных прослойках с толщиной не менее $\Delta z \geq \pi \cdot V \cdot \delta t$.

Если CTD-данные высокого разрешения измерены при соотношении инерционных коэффициентов $R_c < R_t$, то фазовая рассогласованность профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$ уменьшается *процедурой смещения*:

$$T_\zeta(t) = T_m(t + \zeta_M), \quad (20)$$

где величина параметра ζ_M устанавливается по максимуму функции $\Psi_{CT}(\zeta)$. При определении солёности $S_\zeta(t)$ по $C_m(t)$ и $T_\zeta(t)$ вклад динамической погрешности сократится. Ослабление псевдоструктуры солёности до уровня

$$\Delta_d S_\zeta(t) = B^{-1} Y \cdot T_A \cdot \{ 1 - A_t / A_c \cdot \exp(i \cdot \Omega \cdot [\Phi_c - \Phi_t + \zeta_M]) \} \cdot A_c \cdot \exp(i \cdot \Omega \cdot [t - \Phi_c]) \quad (21)$$

приведет к уменьшению дисперсии высокочастотных вариаций на профиле $S_\zeta(t)$ в пределах выделенной прослойки $[t_0; t_b]$:

$$D(S_\zeta) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_b} \left[S_\zeta(t) - \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_b} S_\zeta(\theta) d\theta \right]^2 dt. \quad (22)$$

Поэтому отношение дисперсий $D(S_\zeta) / D(S_m) < 1$, рассчитанных до и после коррекции (20) профиля температуры, можно также использовать в качестве критерия динамической рассогласованности измеренных параметров.

Эффективность процедуры смещения (20) как способа динамической коррекции CTD-данных ограничена толщиной измеренной температурной прослойки и частотой опроса датчиков зонда. Действительно, при толщине прослойки $\Delta z \geq 10 R_t \cdot V$ фазовая компонента рассогласованности $\Delta \Phi_{tc} \approx R_t \cdot R_c$ в основном определяет величину погрешности (21). Однако максимальный учёт этого влияния возможен только при кратности величины фазового сдвига интервалу опроса датчиков $|\Delta \Phi_{tc} - \zeta_M| \ll \delta t$.

При меньшей толщине градиентной прослойки возрастает влияние амплитудной частотной характеристики термометра на погрешности определения температуры и солёности. Для ранее рассмотренного примера модельных CTD-данных, которые соответствуют случаю тонкой ГП ($10 R_t \gg \Delta t_c \approx 0,5$ с), функция взаимной корреляции $\Psi_{CT}(\zeta)$ имеет максимум при $\zeta_M = 0,08$ с ($n = 2$). Коррекция профиля $T_m(t)$ процедурой (20) на этой же величине смещения приводит к минимальному отношению дисперсий высокочастотных компонент солёности $D(S_\zeta) / D(S_m) \approx 0,4$, но амплитуды ложных выбросов на профилях солёности $S_\zeta(t)$ и плотности $\rho_\zeta(t)$ сократились незначительно (рис. 4).

Экспоненциальные фильтры (11, 12) являются при-

близительным решением выражений (1) для измеренных параметров морской воды. Следовательно, для устранения рассогласованности CTD-данных возможны два варианта динамической коррекции: метод сглаживания, при котором используется фильтр (11), и метод обострения, когда на эти данные воздействуют обратной функцией [10].

При рекомендуемых скоростях зондирования электропроводность измеряется с меньшей инерционностью, чем температура. Согласование CTD-данных экспоненциальным сглаживанием (12) профиля $C_m(t)$ при $R_s \sim (R_t - R_c)$ понижает уровень динамической погрешности солености $S_s(t) = S(T_m, C_s)$:

$$\Delta_d S_s(t, \Omega) \approx Y \cdot B^{-1} T_A \cdot \{A_{c_s} \cdot \exp[i \cdot F_{c_s}] - A_t \cdot \exp[i \cdot F_t]\} \exp[i \cdot \Omega \cdot t] \quad (23)$$

за счёт уменьшения произведения амплитудных частотных функций $A_{c_s} = A_c A_s \rightarrow A_t$ и повышения абсолютной величины суммы фазовых $F_{c_s} = (F_c + F_s) \rightarrow F_t$. Однако полного устранения этой погрешности достичь не удаётся, $\Delta_d S_s(t, \Omega) \neq 0$ при любых значениях параметра сглаживания $R_s > 0$. Фазовая рассогласованность профилей $T_m(t)$ и $C_s(t)$ отсутствует при величине $R_{fs}(\Omega) \approx \Omega^{-1} \text{tg}[\text{arctg}(\Omega \cdot R_t) - \text{arctg}(\Omega R_c)] \leq R_t - R_c$, а равенство амплитудных характеристик $A_{c_s} = A_t$ возможно при

$$R_{As}(\Omega) \approx \sqrt{\frac{R_t^2 - R_c^2}{1 + (\Omega \cdot R_c)^2}} < R_t.$$

Учитывая сложный характер рассогласованности CTD-данных (расхождения по амплитудам, фазам и масштабам), для оценки оптимальной величины параметра R_s используется метод наименьших квадратов. В этом случае, сглаживая измеренную электропроводность экспоненциальным

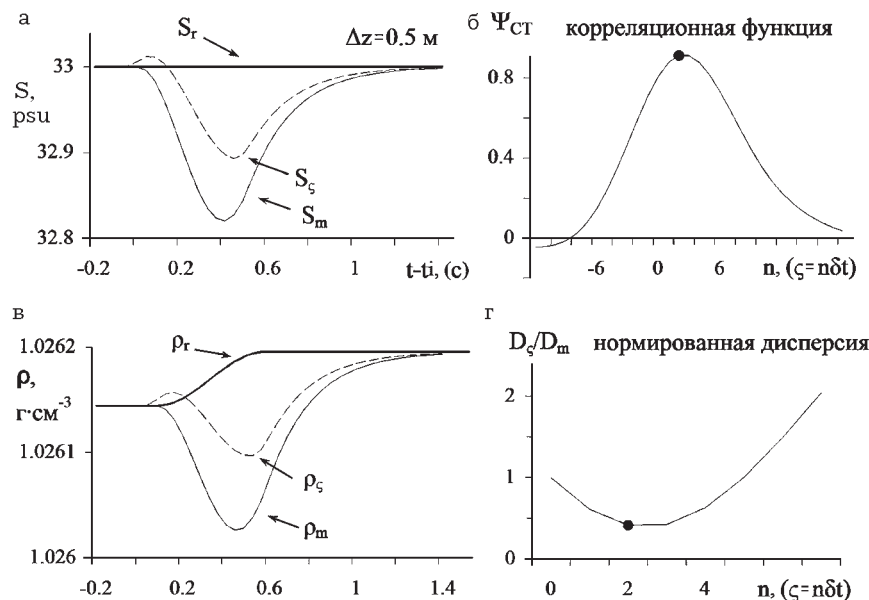


Рис. 4. Результаты фазовой коррекции (20) модельных CTD-данных (рис. 3). Профили солености (а) и плотности (в): $S_s(t)$ и $\rho_r(t)$ – заданные, $S_m(C_m, T_m)$ и $\rho_m(S_m, T_m)$ – измеренные, $S_c(C_m, T_c)$ и $\rho_c(S_c, T_c)$ – рассчитанные после коррекции (20) профиля измеренной температуры. Функция взаимной корреляции $\Psi_{ct}(\zeta)$ (16) (б), рассчитанная по $T_m'(t)$ и $T_c'(t)$. Отношение дисперсий высокочастотных компонент профилей солености $D(S_c)/D(S_m)$, рассчитанных при различных значениях параметра смещения ζ (г)

фильтром (12) при различных $R_{sn} = R_t - n \cdot \delta t$ с шагом $\delta t \ll R_t$ и $n=0, 1, 2, \dots$, рассчитывается серия профилей $S_{sn}(t)$. Далее из этой серии выделяется профиль солености с минимальной величиной дисперсии (22):

$$\min \{D(S_{sn})\} = D\{S(R_{sM})\}. \quad (24)$$

Анализ результатов коррекции модельных CTD-данных фильтром (12) с учетом (24) показал, что оптимальные величины параметра сглаживания в среднем на 6 % превосходят разность инерционных коэффициентов, $R_{sM} \approx 1,06 \cdot (R_t - R_c)$. Ослабление амплитуд ложных выбросов на профиле солености $S_{sM}(t)$ происходит из-за уравнивания относительных величин динамических погрешностей, $\Delta_d C_s(t) \rightarrow Y \cdot \Delta_d T_m(t)$. Однако при этом сохраняется погрешность определения температуры $\Delta_d T_m$ и вертикальные масштабы градиентных прослоек остаются завышенными по отношению к реальным.

Отмеченные недостатки практически отсутствуют при

динамической коррекции CTD-данных методом экспоненциального обострения. Если в процессе измерения термометр обладал большей инерционностью, чем датчик электропроводности, $R_t > R_c$, то обостряется профиль температуры $T_m(t)$:

$$T_d(t) = \{T_m(t) \cdot \exp[-\delta t / R_d] \cdot T_m(t - \delta t)\} / \{1 - \exp[-\delta t / R_d]\}, \quad (25)$$

где R_d – параметр обострения.

Коррекция CTD-данных с помощью (25) и критерия $\min\{DS_d\}$, оптимизирующего поиск величины параметра R_d , приводит не только к понижению уровня динамической погрешности солености $S_d(t) = S(T_d, C_m)$,

$$\Delta_d S_d(t, \Omega) \approx Y \cdot B^{-1} T_A \cdot \{A_c \cdot \exp[i \cdot F_c] - A_{td} \cdot \exp[i \cdot F_{td}]\} \exp[i \cdot \Omega \cdot t], \quad (26)$$

но и к уточнению структуры профиля температуры. При $R_d = R_{dM}$ погрешность $\Delta_d S_d \rightarrow 0$, т.к. рассогласованность между частотными характеристиками откорректированной

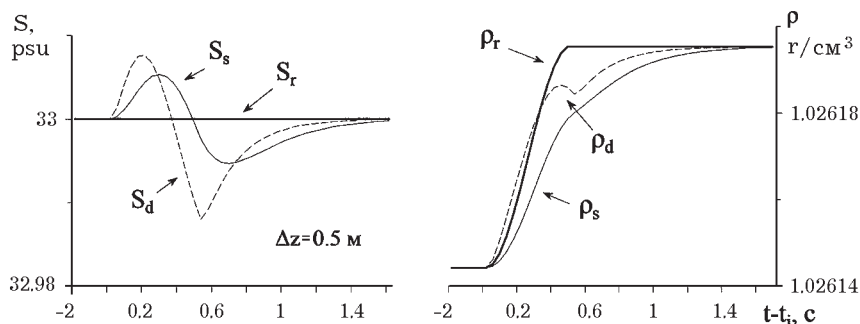


Рис. 5. Результаты экспоненциальной коррекции модельных CTD-данных (рис. 3). Профили солёности и плотности: $S_r(t)$ и $\rho_r(t)$ – заданные, $S_s(C_s, T_m)$ и $\rho_s(S_s, T_m)$ – рассчитанные методом сглаживания (11, 24) профиля $C_m(t)$ при $R_s \approx 0,22$ с, а также $S_d(C_m, T_d)$ и $\rho_d(S_d, T_d)$ – после обострения (25, 24) профиля $T_m(t)$ при $R_d \approx 0,22$ с

температуры и измеренной электропроводности практически отсутствует, $A_c \approx A_{td} = A_t A_d$ и $F_c \approx F_{td} = F_t + F_d$, где коэффициенты $A_d > 1$ и $F_d > 0$ – характеризуют выражение (25). Динамическая погрешность профиля температуры $T_d(t)$ достигает минимума.

Оба метода экспоненциальной коррекции CTD-данных способствуют уменьшению максимальных амплитуд ложных выбросов в структурах профилей солёности в $10 \div 40$ раз. На рис. 5 представлены профили $S_s(t)$ и $S_d(t)$, рассчитанные по модельным CTD-данным варианта тонкой градиентной прослойки $\Delta z = 0,5$ м (рис. 3). Наблюдаемые амплитуды остаточных ложных отклонений $|S_s - S_r| \leq 0,005$ psu и $|S_d - S_r| \leq 0,012$ psu отличаются на порядок от результата применения метода фазового сдвига $|S_s - S_r| \leq 0,1$ psu (рис. 4).

Профили плотности ρ_s и ρ_d (рис. 5), рассчитанные после коррекции CTD-данных методами (12) и (25), также имеют минимальные расхождения с исходным распределением ρ_r . Они не содержат обширных (сопоставимых с толщиной градиентных прослоек) ложных инверсий, характерных для профилей $\rho_m(t)$ и $\rho_s(t)$ (рис. 4).

Наибольший эффект подавления динамических погрешностей CTD-данных наблюдается в модельных расчетах

при параллельном обострении профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$. Учитывая обратимость процедур фильтрации (11, 12) при тождественном равенстве параметров обострения и соответствующих инерционных коэффициентов, $R_{td} \equiv R_t$ и $R_{cd} \equiv R_c$, имеет место максимальная согласованность между профилями $T_d(t)$ и $C_d(t)$.

■ Динамическая коррекция натуральных CTD-данных

CTD-данные, полученные в условиях натурального эксперимента, содержат динамические, случайные и систематические погрешности. При динамической коррекции (12) или (25) случайные погрешности измеренных характеристик морской воды изменяются за счет коэффициента, содержащего $1 - \exp(-\delta t/R)$. Если соответствующие параметры обработки превосходят временной масштаб разрешения, $R/\delta t = K \geq 1$, то вес этого коэффициента находится в пределах: $K^{-1} > 1 - \exp(-\delta t/R) \geq (K + 0,5)^{-1}$.

Экспоненциальное сглаживание (12) измеренной электропроводности уменьшает уровень случайной погрешности профиля $C_s(t)$ минимум в \sqrt{K} раз, но, учитывая неизменность в процессе обработки показаний термометра, случайные погрешности косвенного определения солёности и плотности пони-

зятся незначительно. Если же измеренная температура корректируется методом экспоненциального обострения (25), то её случайные погрешности возрастают и на профилях рассчитанных параметров $S_d(C_m, T_d)$ и $\rho_d(S_d, T_d)$ наблюдаются высокие уровни шума.

Другой, более значимой, особенностью натуральных CTD-данных является нелинейность инерционных эффектов, которые сопровождают измерение температуры [4, 9]. Исследования частотных характеристик различных термометров, выполненные в МГИ НАНУ (г. Севастополь), показали, что эти преобразователи следует рассматривать как инерционные звенья 1-го порядка со сдвигом. В упрощенном виде такое описание укладывается в схему «экспоненциальный фильтр + смещение»:

$$T_r(t) \approx T_m(t + \zeta) + R_t(t) \cdot T_m'(t + \zeta), \tag{27}$$

а инерционный коэффициент термометра аппроксимируется суммой двух компонент: $R_t^* = R_t + \zeta$. Первая компонента $R_t(V)$ зависит от скорости движения зонда V и соответствует параметру экспоненциального фильтра (11). Вторая $\zeta \approx \text{const}$ – отражает наличие в температурных данных дополнительного фазового сдвига по отношению к профилю измеренной электропроводности. Её полный учёт с помощью процедуры (20) возможен только при обработке CTD-данных, измеренных с высокой частотой опроса, $\delta t \ll \zeta$.

Поэтому выбор метода динамической коррекции для конкретных натуральных CTD-данных и оценка эффективности его применения должны учитывать масштабы исследуемых процессов и технические характеристики используемого прибора.

В качестве примера рассмотрим *CTD*-данные, полученные измерительным комплексом Mark-IIIС (GO, США), который эксплуатируется в экспедициях ТОИ ДВО РАН. Технические характеристики этого зонда уникальны. Стандартный комплект датчиков включает ячейку проводимости NB, датчик давления Paine, платиновый термометр Rosemount и термистор Fenwal. В процессе зондирования датчики свободно омываются набегающим потоком жидкости. При частоте опроса 25 Гц и 16-разрядном АЦП зонд Mark-IIIС обеспечивает высокое разрешение и точность измерения основных параметров морской воды: $\delta t=0,04$ с, $\delta T=0,0005^\circ\text{C}$, $\delta C=0,001$ мСм/см и $\delta P=0,1$ дбар.

На рис.6 представлены профили электропроводности $C_m(t)$, гидростатического давления $P_m(t)$ и температуры $T_m(t)$, измеренные *CTD*-зондом Mark-IIIС в Японском море на станции № 35 в ноябре 2003 г. Продолжительность зондирования от поверхности моря до придонного слоя (горизонт 94 м) составила 104 с.

В момент зондирования на станции № 35 море имело трехслойную структуру, характерную для северного шельфа Японского моря: верхний квазиоднородный слой (ВКС), термоклин и придонный квазиоднородный слой (ПКС) (рис. 6). Толщина ВКС около 10 м. Его средняя температура, измеренная платиновым термометром, составила $\bar{T}_{mB} \approx 6,954^\circ\text{C}$ (рис. 7). Показания термистора, усредненные в этом слое, имели меньшую величину $\bar{T}_{fB} \approx 6,943^\circ\text{C}$. В придонном квазиоднородном слое, который располагался ниже горизонта 85 м, средняя температура воды по термометру и термистору, была соответственно равна $\bar{T}_{mП} \approx 2,094^\circ\text{C}$ и $\bar{T}_{fП} \approx 2,073^\circ\text{C}$. Расхождения между показаниями термодатчиков – в верхнем слое не более $0,01^\circ\text{C}$, а в придонном возросли до $0,02^\circ\text{C}$ – обусловлены нестабильностью метрологических характеристик термистора [2, 9].

Термоклин, слой расположенный между ВКС и ПКС, имел в момент измерения толщину не более 75 м и

среднюю величину градиента $\bar{T}'_{mT} \approx -0,065^\circ\text{C}/\text{м}$. Структура термоклина неоднородная и содержала прослойки с высокими и слоя с низкими температурными градиентами. Толщина прослоек составляла, как правило, менее 1 м, а текущие значения производной $T'_m(t)$ на порядок превосходили её среднюю величину.

Профиль солёности $S_m(t)$, рассчитанный по исходным данным, демонстрирует серию ложно-структурных вариаций на всем протяжении термоклина, обусловленных динамической рассогласованностью измеренных параметров. Отдельные выбросы на профиле $S_m(t)$ достигают $0,1 \div 0,2$ psu, в то время как разность между средними значениями солёности морской воды верхнего $\bar{S}_m(t) \approx 34,02$ psu и придонного $\bar{S}_{mB} \approx 34,04$ psu слоёв на порядок меньше (рис. 6).

В слое термоклина величина фонового градиента солёности мала, $\bar{S}'_{mT} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ psu/м, и выполняется условие однородности $\bar{Y}|\bar{T}'_{mT}| \gg \bar{B}|\bar{S}'_{mT}|$ при зна-

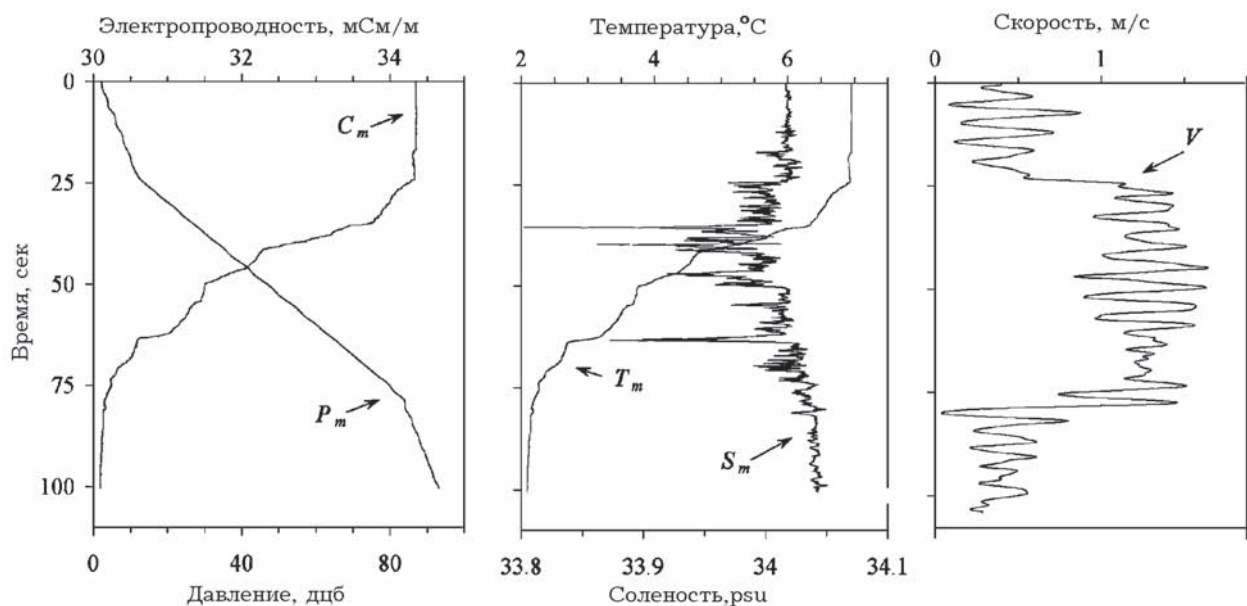


Рис. 6. Исходные данные, полученные *CTD*-зондом Mark-IIIС на станции № 35: давление $P_m(t)$, измеренное датчиком Paine, электропроводность $C_m(t)$ – ячейкой NB и температура $T_m(t)$ – термометром Rosemount, а также рассчитанные $S_m(C_m, T_m)$ – солёность и $V_z(t) \approx P'_m(t)$ – вертикальная компонента скорости движения измерительного комплекса. Японское море, 37-й рейс НИС «Профессор Гагаринский», ТОИ ДВО РАН, ноябрь 2003 г.

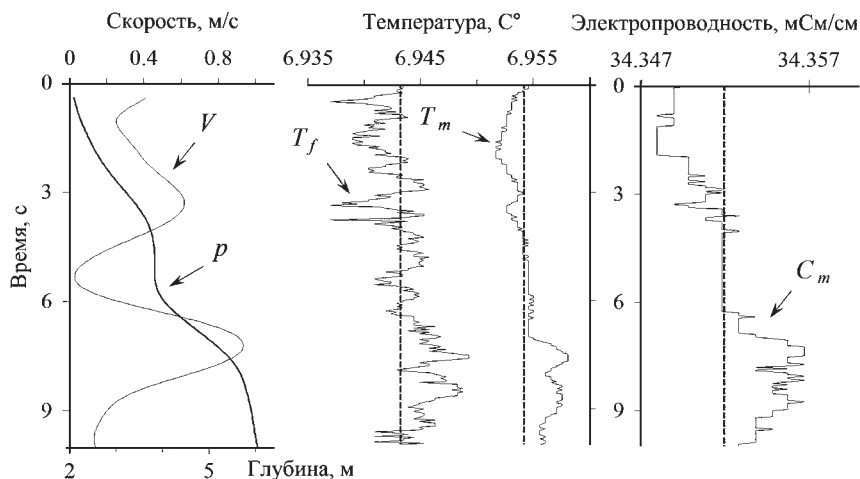


Рис. 7. Фрагменты профилей: давления $P(t)$, скорости $V(t)$, электропроводности $C_m(t)$, температуры $T_m(t)$, измеренной платиновым термометром и $T_f(t)$ – термистором, полученные в верхнем квазиоднородном слое. Станция № 35

чениях $\bar{B} \approx 0,84$ мСм/см/psu и $\bar{Y} \approx 0,88$ мСм/см/°С. Поэтому, оценивая параметры температурных градиентных прослоек рассматриваемого зондирования, можно пренебречь влиянием соленостной стратификации на структуру профиля электропроводности.

В термоклине зонд перемещался со скоростью $1 \div 1,5$ м/с (рис. 6). В этом динамическом диапазоне инерционность ячейки NB составляет $R_c \leq 0,03$ с, термометра $R_t \approx 0,25$ с. Таким образом, имеем оценки средних величин динамических погрешностей CTD-данных: $\Delta_d T_m \approx -0,02$ °С, $\Delta_d C_m \approx -0,003$ мСм/см и $\Delta_d S_m \approx 0,02$ psu. В градиентных прослойках термоклина текущие значения динамических погрешностей измеренных параметров были на порядок выше.

В квазиоднородных слоях практически отсутствуют прослойки с высокими градиентами. Поэтому динамическими погрешностями CTD-измерения на этих интервалах можно пренебречь. Высокочастотные флуктуации на профилях электропроводности и температуры (рис. 7), выделяемые на масштабах $\Delta t \leq 0,5$ с, соответствуют случайным ком-

понентам инструментальных погрешностей. Определив их дисперсии D (22), получим оценки инструментальных случайных погрешностей CTD-измерения по критерию $2\sqrt{D}$, т.е. при доверительной вероятности 95%.

Случайная погрешность в показаниях термометра Rosemount оценивается величиной $\Delta_c T_m = 2\sqrt{D} \approx 0,0006$ °С, которая практически совпала с шагом квантования δT . В тех же слоях шум термистора превысил этот предел в шесть раз, $\Delta_c T_f \approx 0,003$ °С, а уровень случайной погрешности электропроводности $\Delta_c C_m \approx 0,002$ мСм/см оказался в два раза выше δC . Аналогичная оценка в структуре профиля солености $S_m(t)$ в редких случаях превышала предел $\Delta_c S_m \approx 0,003$ psu.

При зондировании на станции № 35 максимальный температурный градиент был зарегистрирован на 36-й секунде измерения, в пределах временного интервала $\Delta t \approx 10\delta t$. При пересечении высокоградиентной прослойки измерительный комплекс двигался предположительно на конечном временном отрезке фазы ускорения со скоростью $V \approx 1,4$ м/с. Следовательно, инерцион-

ность ячейки NB минимальна, $R_c < 0,03$ с. Пренебрегая влиянием динамических погрешностей на структуру профиля $C_m(t)$, получим оценку толщины градиентной прослойки: $\Delta z = V \cdot \Delta t \approx 0,6$ м. Изменения температуры на этом интервале составили $-0,4$ °С, а профиль солености, рассчитанный по исходным данным, содержит искажения, которые достигают $\Delta_d S_m \leq 0,2$ psu, рис. 6.

Рис. 8 демонстрирует производные температуры $T'_m(t)$ и нормированной электропроводности $Y^{-1} \cdot C'_m(t)$ в пределах выделенной градиентной прослойки. Схожесть её параметров и рассмотренного ранее модельного варианта ($\Delta z = 0,5$ м, рис. 3) позволяет выявить отличия реального проявления инерционных эффектов при CTD-измерениях от их модельного (линейного) представления.

Структурные элементы на профиле $T'_m(t)$ имеют меньшую амплитуду и запаздывают относительно $Y^{-1} \cdot C'_m(t)$ (рис. 8). Из анализа функции взаимной корреляции (16) получим среднюю величину смещения, $\max\{\Psi_{CT}(\zeta)\} = \Psi_{CT}(0,12$ с). В модельном примере фазовый сдвиг между аналогичными структурами оценивался меньшей величиной, $\Delta\Phi_{tc} = 0,08$ с. Амплитуды производных $T'_m(t)$ и $Y^{-1} \cdot C'_m(t)$ различаются на 47%, а в модельном примере на 30% ($\Delta A_{tc} \approx 0,7$). Так, экстремум нормированной производной измеренной электропроводности, $Y^{-1} \cdot C'_m(t) \approx -2,3$ °С·с⁻¹, имел место в момент времени $t = 35,36$ с. В показаниях термометра максимальные изменения проявились позже на три такта, $T'_m(35,48) \approx -1,1$ °С·с⁻¹.

Экспоненциальное обострение профиля $T'_m(t)$ при $R_d = 0,15$ с уравнивает амплитуды экстремумов, $Y^{-1} \cdot C'_m(35,36) \approx T'_d(35,44)$, но не устраняет фазовый сдвиг. Поэтому при расчёте солености по $C_m(t)$ и $T_d(t)$ ложная структу-

ра уменьшается незначительно, $\Delta S_d \leq 0,15$ psu. После процедуры смещения (20) показаний температурного профиля при $\zeta = 0,08$ с исчезает динамическая рассогласованность между $C_m(t)$ и $T_\zeta(t) = T_d(t+\zeta)$. Псевдоструктура солености на профиле $S_{d\zeta}(t) = S(C_m, T_\zeta)$ практически отсутствует (рис. 8).

Обработка пары профилей $C_m(t)$ и $T_f(t)$ на выделенном интервале CTD-зондирования имеет аналогичный результат, но при меньших значениях параметров комбинированной динамической коррекции (25, 20), $R_{fd} \approx 0,03$ с и $\zeta_f = 0,04$ с.

Таким образом, натурные данные CTD-зонда Mark-IIIС благодаря высокому разрешению удовлетворяют условию $\delta t \ll \zeta$ и соответствуют схеме (27). Динамическую коррекцию этих данных выполним методом комбинированного обострения (25, 20), а выбор параметров коррекции R и ζ осуществим по критерию $\min\{D(S)\}$.

При $R_{td}^* = 0,146 \pm 0,08$ с и $R_{fd}^* = 0,057 \pm 0,04$ с ложные вариации на профилях солености $S_{d\zeta}(t)$ и $S_{fd\zeta}(t)$ сокращаются до минимальных значений. В результате коррекции усредненные по всему интервалу зондирования величины дисперсий солености $D(S_m)$ и $D(S_f)$ (22), рассчитанные при $\Delta t = 1,5$ с, уменьшаются в 26 и 6 раз соответственно. В то же время обострение профилей $T_m(t)$ и $T_f(t)$ способствует росту их случайных погрешностей. При расчете профиля $S_{fd\zeta}(t)$ амплитуды высокочастотных вариаций (в пределах ВКС) практически не изменяются (из-за малости параметра R_{fd}), а в структуре профиля $S_{d\zeta}(t)$ уровень случайного шума увеличился в два раза, $\Delta S_{d\zeta} \approx 0,006$ psu. На рис. 9 профили солености $S_{d\zeta}(t)$ и $S_{fd\zeta}(t)$ на интервале зондирования 25 ÷ 70 с (слой термоклина) пред-

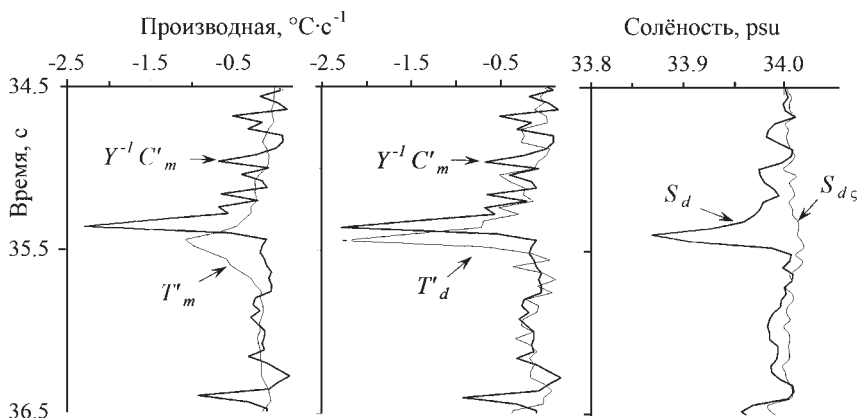


Рис. 8. Производные температуры $T'_m(t)$ – до и $T'_d(t)$ – после экспоненциального обострения (25) при $R_d = 0,15$ с, а также нормированной электропроводности $Y^{-1} \cdot C'_m(t)$. Профиль солености $S_{d\zeta}(t)$, рассчитанный по $C_m(t)$ и $T_d(t)$, и $S_{d\zeta}(t)$ – по $C_m(t)$ и $T_f(t+\zeta)$ при $\zeta = 0,08$ с. Интервал 34,5 ÷ 36,5 с CTD-зондирования на станции № 35

ставлены после процедуры осреднения при ширине окна $\Delta t = 0,5$ с.

Эффективность динамической коррекции CTD-данных принято оценивать по критерию устойчивости плотностной стратификации. Выполнение условия $\rho_\theta'(z) \geq 0$ означает, что удалось учесть основной вклад динамических погрешностей CTD-данных. В противном случае при наличии в структуре рассчитанной потенциальной плотности $\rho_\theta(S_{d\zeta}, T_{d\zeta})$ интервалов с отрицательными градиентами по глубине требуется дополнительная обработка CTD-данных.

Потенциальная плотность $\rho_\theta(t)$, рассматриваемого CTD-зондирования имеет наибольший отрицательный градиент на 47-й секунде измерения в слое толщиной $\Delta z \approx 0,6$ м. Неустойчивое распределение $\rho_\theta(t)$ на интервале термоклина обусловлено инверсией в структуре профиля солености $S_{d\zeta}(t)$, рис. 9. Предложенный способ динамической коррекции профиля $T_m(t)$ при $R_{td}^* \approx 0,23$ с не устраняет полностью эту инверсию. Согласно исходным данным на интервале 45 ÷ 49 с профиль солености имел ложный выброс $\Delta S_m \leq 0,09$ psu, а

после обострения (25, 20) при $R_{td}^* \approx 0,23$ с он сократился в три раза, $\Delta S_{d\zeta} \leq 0,03$ psu, в то время как соленость $S_{fd\zeta}(t)$, рассчитанная после аналогичной коррекции температуры $T_f(t)$ при $R_{fd}^* \approx 0,1$ с, не содержит локального образования, схожего по интенсивности на тех же горизонтах (рис. 9).

Сопоставляя профиль солености с вариациями скорости зондирования, которые вызваны качкой судна, отмечаем, что проблемный интервал CTD-измерения выполнен на фазе торможения зонда, рис. 9. Кроме того, другим аналогичным интервалам $V(t)$ соответствуют характерные искажения в структуре профиля $S_{d\zeta}(t)$. В частности, к ним относятся ложные выбросы на 37-й, 43-й, 57-й и 61-й секундах зондирования. Они имеют меньшие амплитуды, но выявляются при сравнении со структурой профиля $S_{fd\zeta}(t)$.

Коррекция данных с учётом зависимостей $R_t(V)$ и $R_c(V)$, имеющих вид (2, 3), позволяет дополнительно сократить амплитуды ложных выбросов на профиле $S_{d\zeta}(t)$, но незначительно, всего на 5-10%. Применение критерия $\min\{D(S)\}$ для оптимизации выбора параметра

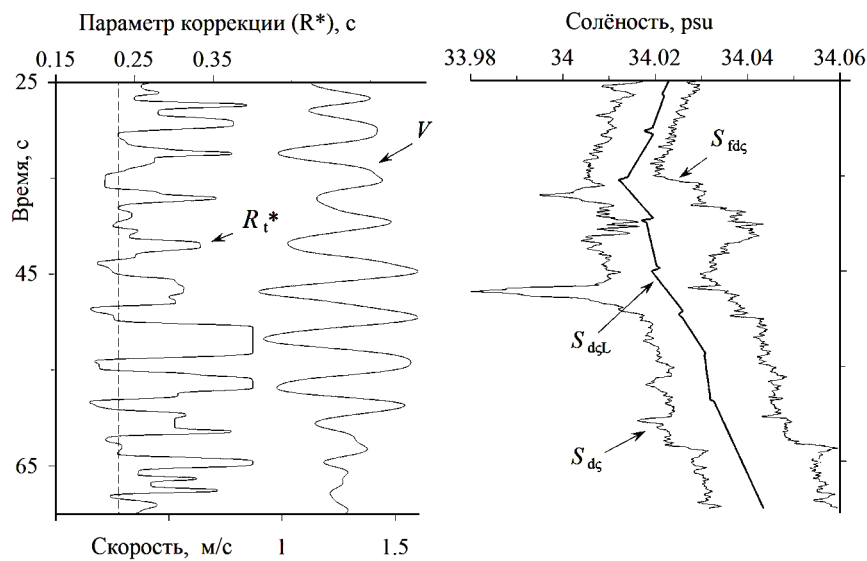


Рис. 9. Скорость зондирования $V(t)$, параметр коррекции $R_{id}^*(t)$, солёность $S_{dc}(t)$ и $S_{fidc}(t)$, рассчитанные после динамической коррекции (25, 20) при $R_{id}^* = 0,146 + 0,08$ с и $R_{fid}^* = 0,057 + 0,04$ с, на интервале CTD-измерения в слое термоклина. Солёность $S_{dcl}(t)$ содержит данные профиля $S_{dc}(t)$ при условии $R_{id}^*(t) \leq 0,25$ с, на прочих интервалах выполнена линейная интерполяция. Станция № 35. Значения $S_{fidc}(t)$ представлены со смещением на 0,01 psu

$R_{id}^*(t)$ по каждому такту CTD-измерения также не приводит к удовлетворительному результату. Тем не менее удалось выявить важную особенность в вариациях параметра коррекции. На интервалах локальных минимумов скорости зондирования значения $R_{id}^*(t)$ возрастают в полтора раза (рис. 9) и структуры ложных выбросов $S_{dc}(t)$ видоизменяются. Но при этом дисперсия флуктуаций солёности, а следовательно, и погрешности определения её величин уменьшаются незначительно.

Рост параметра коррекции $R_{id}^*(t)$ на интервалах локальных минимумов скорости движения прибора свидетельствует об увеличении эффекта инерционных процессов при измерении температуры. Возможной причиной повышения инерционности платинового термометра является резкое изменение структуры пограничного слоя вблизи его поверхности, вызванное попаданием блока датчиков в собственный турбулентный след корпуса

зонда (влияние качки и дрейфа судна). В возмущённом потоке морской воды пограничный слой нестабилен, и его толщина $h \sim v^*/V$ увеличивается из-за роста турбулентных пульсаций $v^* \rightarrow V$. Кроме того, линейные размеры термометра Rosemount превосходят в несколько раз габариты термистора и ячейки проводимости NB, что также повышает величину его инерционности.

Изменения динамической погрешности при определении температуры, вызванные попаданием датчиков в собственный турбулентный след зонда, обусловлены способом измерения. Этот способ предполагает жёсткую связь по кабель-тросу между погружаемым устройством и бортом экспедиционного судна. Следовательно, такие изменения погрешности являются методическими. Они проявляются в CTD-данных случайным образом на фазах торможения прибора и, как правило, локально в градиентных слоях. Эту часть погрешности CTD-измерения невозможно кор-

ректно учесть при определении косвенных характеристик морской воды, прежде всего её солёности, значения которой, рассчитанные в слое термоклина на интервалах локальных минимумов скорости движения зонда, являются артефактами. Если амплитуды ложных выбросов в структуре профиля солёности сопоставимы с масштабом её фоновой изменчивости в исследуемом слое, то эти интервалы необходимо исключать из последующего анализа CTD-данных.

Принимая во внимание причины возникновения методической погрешности измерения температуры, предполагаемые артефакты солёности следует устранять по критерию $V(t) < \bar{V}(t)$, где $\bar{V}(t)$ текущая средняя скорость зондирования, определенная скользящим осреднением по интервалу 1 с. Этот способ учёта методической погрешности исключает данные по солёности интервалами, равными половине периода качки судна. Но можно использовать и другие оценки. Для CTD-данных зонда Mark-IIIС применим критерий $R_{id}^*(t) > \text{Const}$, который точнее определяет границы интервалов с высокой (нестандартной) рассогласованностью измеренных параметров. Профиль $S_{dcl}(t)$, рис. 9, сформирован из данных профиля $S_{dc}(t)$ при условии $R_{id}^*(t) \leq 0,25$ с. Расчёт значений солёности на интервалах измерения, которые соответствуют $R_{id}^*(t) > 0,25$ с, выполнен с помощью линейной интерполяции. Для зондирования на станции № 35 в слое термоклина объём исключённых данных по солёности превышает 75%. Предложенный способ коррекции CTD-данных высокого разрешения позволяет уменьшить суммарную погрешность солёности в темпе-

ратурных градиентных слоях до уровня 0,003 psu.

Таким образом, рассмотренный пример *CTD*-данных зонда Mark-IIIС позволяет сделать следующий вывод. Океанографические данные, полученные в условиях качки судна при стандартном способе измерения параметров морской воды (а именно, когда приборный комплекс опускается с борта дрейфующего судна с использованием кабель-троса и лебёдки), содержат методические погрешности на масштабах менее 3÷5 м, которые невозможно полностью учесть и устранить.

Поэтому массивы измеренных и рассчитанных параметров морской воды целесообразно формировать с фиксированной дискретностью по глубине 1 м и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема динамических погрешностей *CTD*-данных исследована в рамках линейной модели. В результате получены качественные и количественные оценки проявления инерционных эффектов *CTD*-измерения при различных параметрах стратификации морской воды и скорости зондирования. В том числе предложены критерии динамической рассогласованности измеренных профилей температуры и электропроводности, показаны преимущества и недостатки методов сдвиговой и экспоненциальной коррекции *CTD*-данных.

Из анализа натурных *CTD*-данных зонда Mark-IIIС получено подтверждение нелинейного характера переходных процессов в термодатчиках, которые

могут быть представлены инерционным звеном 1-го порядка с запаздыванием. С учётом выявленных закономерностей предложен метод комбинированной динамической коррекции температурного профиля, который включает процедуры фазового смещения и экспоненциального обострения этого профиля. Для определения параметров коррекции используется критерий минимума дисперсии высокочастотных вариаций рассчитанной солёности.

Представленные результаты обработки натурных данных зонда Mark-IIIС показали снижение эффективности этого метода коррекции на интервалах измерения, которые соответствуют фазам торможения *CTD*-комплекса (обусловленных качкой и дрейфом судна).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарюк А.Ю. Об инерционности датчиков температуры и электропроводности *CTD*-зондов // *Океанология*. 2008. №6. С. 936-939.
2. Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
3. Нелепо Б.А., Смирнов Г.В., Шадрин А.Б. Интегральные системы для гидрофизических исследований. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 447 с.
4. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др. *Океанология: средства и методы океанологических исследований*. М.: Наука, 2005. 795 с.
5. Emery W.J., Thomson R.E. *Data analysis methods in physical oceanography*. New York: Pergamon, 1998. 634 p.
6. Giles A.B., McDougall T.J. Two methods for the reduction of salinity spiking of *CTD*'s // *Deep-Sea Res.* 1986. Vol. 33, No. 9. P. 1253-1274.
7. Gregg M.C. Dynamic response calibration of the Neil Brown conductivity cell // *J. Phys. Oceanogr.* 1982. Vol. 12, No. 7. P. 720-742.
8. MARK-IIIС/WOCE. 1994. Operation manual. Part № 00201. 60 p.
9. Millard R., Toole J., Swartz M. A fast responding temperature measurement system for *CTD* application // *IEEE Journ. of Oceanic Engineering*. 1980. Vol.7. P. 413-427.
10. The acquisition, calibration, and analysis of *CTD* data // *UNESCO technical papers in marine science*. 1988. Vol. 54. 94 p.
11. Trump C.L. Effects of ship's roll on the quality of precision *CTD* data // *Deep-Sea Res.* 1983. Vol. 30. No. 11A. P. 1173-1183.