

Результаты исследования метрологических характеристик профилографа YSI CastAway-CTD

А.Н. Рамазин¹,
А.Ю. Лазарюк²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ФГБНУ «ТОИ ДВО РАН»), г. Владивосток

E-mail: ramazin@vniro.ru, lazaryuk@poi.dvo.ru

Представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию метрологических характеристик профилографа YSI CastAway-CTD. Рассмотрены факторы, определяющие суммарную стандартную неопределённость (ССН) калибровки датчиков температуры и удельной электропроводимости (УЭП). Выполнен расчёт стандартных неопределённостей отдельных компонентов ССН. Из анализа выявленных систематических отклонений в показаниях датчиков тестируемых экземпляров CastAway-CTD получены оценки пределов временного дрейфа калибровочных характеристик. Для устранения систематического эффекта в данных профилографов использовались корректирующие уравнения 3-го порядка. Установлено, что после коррекции данных оценки расширенной ССН датчиков температуры и УЭП (в пределах рабочих диапазонов $-1,6 \leq T \leq 30$ °C и $27 \leq C \leq 57$ мСм/см) не превысили значений, заявленных производителем. На основе экспериментальных данных продемонстрировано, что тепловая инерционность корпуса зонда является одной из значимых метрологических характеристик профилографа, способной исказить картину стратификации исследуемых водных масс.

Ключевые слова: CTD-зонд, профилограф YSI CastAway-CTD, стандартная, суммарная, расширенная неопределённость, временной дрейф, датчики, контраст температур, проточный канал.

ВВЕДЕНИЕ

Ценность информации, полученной современными автономными профилографами, или CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) зондами, в полевых условиях, определяется мерой допустимой её потери, которая зависит от совершенства средств и методов, используемых при проведении гидрологических работ. В настоящее время, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54500.3–2011 [ГОСТ, 2012] количественную оценку качества результата измерений выражают термином неопределённость – «параметром, связанным с результатом измерения, который характеризует разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине» [Походун, 2006]. Все неопределённости делятся на 2 типа: оцениваемые по типу А или по типу В. Оценки, полученные при статистической обработке результатов многократных измерений, относят к типу А. Оценки, сделанные на основе анализа нестатистической информации, на базе научного суждения, основанного на всей доступной возможной информации об из-

менчивости измеряемой величины, относят к типу В [ГОСТ, 2012].

Неопределённости измерений зарубежных зондов часто отождествляют с понятием «ассигасу» – не всегда корректным выражением абсолютной погрешности. Сравнение действительных значений метрологических характеристик используемого CTD-зонда со значениями, заявленными производителем, повышает корректность оценок неопределённости измеряемых параметров водной среды.

Объективная оценка неопределённости калибровки и измерения используемых средств измерений (СИ) осуществляется по результатам метрологических исследований СИ, их регулярной поверки и калибровки, проводимых в стационарных лабораторных условиях с использованием стандартов, эталонных, образцовых средств измерения и испытательного оборудования.

Уже на этапе лабораторных метрологических испытаний требуются оценки неопределённости измеренных характеристик, а также первичная обработка CTD-данных, ставящая целью опреде-

ления всех составляющих и источников возникновения суммарной неопределённости измерений для их минимизации и выявления основных факторов её возникновения.

При осуществлении таких оценок и выборе алгоритмов обработки необходимо учитывать не только полученные в стационарных условиях уровни неопределённостей измеряемых величин, но и возможные условия эксплуатации прибора.

Эксплуатируются гидрологические зонды в агрессивной морской водной среде (перепады температуры, высокое давление) и, нередко, в сложных погодных условиях (температурные аномалии, качка, дрейф судна). В результате на качество данных CTD-зондирований оказывают влияние не только собственно метрологические характеристики прибора, но и стратификация морской среды [UNESCO, 1982; Giles et al., 1986; Morison et al., 1994], а также условия и методы проведения натурного эксперимента [Trump, 1983; Лазарюк, 2009].

В этой связи, специализированные лабораторные установки также могут использоваться для моделирования некоторых из перечисленных динамических условий. При динамическом тестировании профилографа проявляются индивидуальные особенности реакции его измерительной системы, которые необходимо учитывать, оценивая качество данных CTD-зондирований, а также выполняя их первичную обработку.

В работе обсуждаются результаты экспериментов с двумя экземплярами автономного зонда CastAway-CTD (YSI Incorporated, США), датчики которых тестировались на специализированном прецизионном лабораторном оборудовании и в натурных условиях. В экспериментах моделировались как стационарные, так динамические условия, а именно, тепловой контраст между водной средой и корпусом тестируемого зонда. Для полученных рядов данных выполнен анализ неопределённостей результатов измерений.

Конструктивные особенности профилографа CastAway-CTD

Автономный профилограф CastAway-CTD, внешний вид, которого представлен на рис. 1, является относительно дешевым (около \$6000) средством измерения («карманных размеров»), позволяющий одному человеку осуществлять сбор гидрологических данных приемлемого качества с минимальными затратами времени. Прибор включает электронный модуль, блок

управления и датчики, размещённые в едином ударопрочном, нейтральном к среде корпусе [CastAway-CTD User's Manual, 2010]. Его геометрические размеры (с учётом эластичного банджа, рис. 1а) не превышают 7,2 см в диаметре и 20 см по длине. Вес прибора на воздухе около 610 г, а в воде менее 200 г. Встроенный в прибор GPS-навигатор фиксирует координаты местоположения выполняемого зондирования и позволяет определять значения гравитационной постоянной и глубины погружения с большой точностью [WGS84 Ellipsoid Gravity Formula, 2000; Millard, 1983].

Зонд имеет вмонтированный в корпус жидкокристаллический водонепроницаемый дисплей, который в совокупности с панелью управления и комплектом программ, обеспечивает многофункциональный интерфейс для контроля режи-

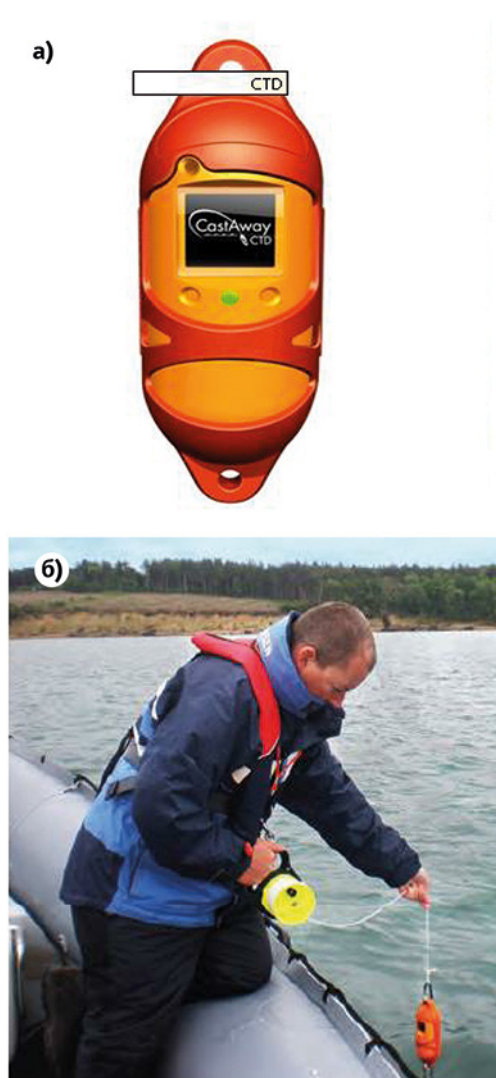


Рис. 1. CTD-зонд YSI CastAway-CTD: а) — внешний вид; б) — зонд в процессе работы

мов функционирования прибора, визуализацию измеренных и расчётных параметров состояния водной среды без необходимости использования ноутбука. Передача данных из памяти CastAway-CTD осуществляется по беспроводной технологии (Bluetooth) на находящийся в пределах досягаемости компьютер. Программное обеспечение под ОС Windows позволяет экспортировать данные зонда в ряд форматов для архивирования и оперативного использования в стандартах Excel, Nupack или Matlab.

Согласно инструкции для обеспечения временной стабильности точностных характеристик CastAway-CTD в течение рекомендованного годового межкалибровочного срока достаточно ополаскивать прибор в чистой воде после каждого зондирования и периодически промывать блок датчиков раствором жидкого мыла (например, Тритон X-100).

Размер, форма и вес CastAway-CTD обеспечивают в режиме «свободного падения» скорость погружения около 1 м/с, а расположение и опрос его датчиков, осуществляемый с частотой 5 Гц, позволяют минимизировать возникающие динамические погрешности измеряемых и рассчитываемых гидрологических параметров в процессе первичной обработки данных CTD-зондирования.

Датчики удельной электропроводности (УЭП) и температуры размещены последовательно внутри проточного канала диаметром 7,5 мм и длиной около 106 мм, который обеспечивает поток воды мимо чувствительных элементов в процессе зондирования. Входное отверстие

датчика давления расположено в нижней части крышки корпуса зонда (рис. 2), а его чувствительный элемент (тензометрический преобразователь) установлен внутри центральной части корпуса рядом с элементами питания.

Датчик УЭП представляет собой ячейку кондуктивного типа с шестью электродами. Центральная пара электродов генерирует электрический ток, а боковые пары используются для измерения сопротивления R расположенного между ними столба морской воды площадью сечения $s \approx 0,441 \text{ см}^2$ и длиной $l \approx 4,0 \text{ см}$. Соответственно, величина удельной электропроводности определяется отношением:

$$C = \frac{l}{R \cdot s} = \frac{K_{cell}}{R},$$

где $K_{cell} \approx 9,0703 \text{ см}^{-1}$ — постоянная ячейки. В данных CastAway-CTD УЭП имеет размерность — $1 \text{ мкСм/см} = 10^{-3} \text{ мСм/см} = 10^{-4} \text{ См/м} = 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

В качестве датчика температуры используется терморезистор, сопротивление которого меняется с изменением температуры [Архипкин и др., 2009].

Основные метрологические характеристики профилографа CastAway-CTD представлены в табл. 1.

Процессор зонда CastAway обеспечивает расчёт вторичных параметров среды: солёности, плотности, скорости звука и глубины, — используя стандартные алгоритмы [Millard, Fofonoff, 1983].

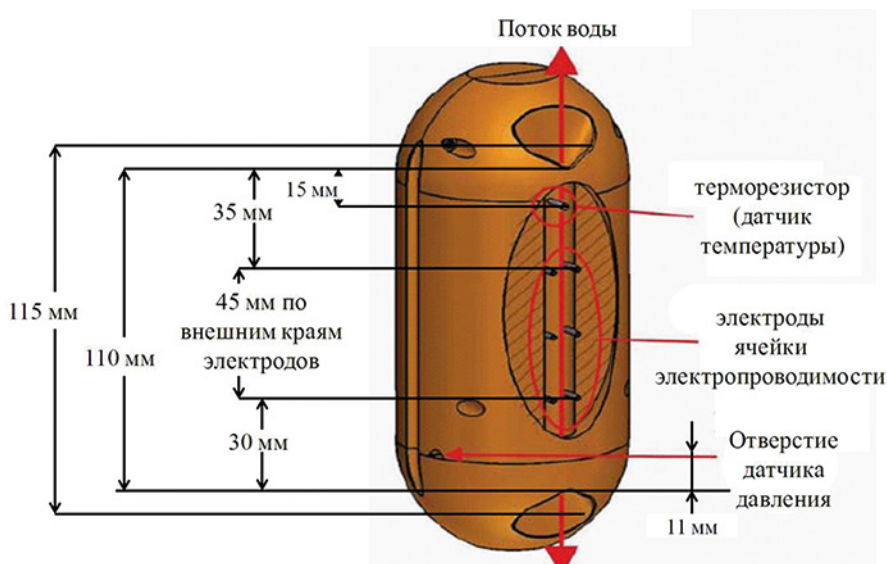


Рис. 2. Геометрические размеры и схема расположения датчиков зонда CastAway-CTD

Таблица 1. Метрологические характеристики зонда CastAway-CTD [CastAway-CTD User's Manual, 2010]

Измеряемые параметры	Диапазон	Точность	Чувствительность
GPS		±10 м	
Давление	0÷100 дбар	±0,25 дбар	0,01 дбар
Температура	-5÷45 °С	0,05 °С	0,01 °С
Электропроводимость	0÷100 мСм/см	0,25 % ±0,005 мСм/см	0,001 мСм/см
Расчётные параметры			
Практическая солёность	до 42	±0,1	0,01
Скорость звука	1400÷1730 м/с	±0,15 м/с	0,01 м/с
Плотность	990÷1035 кг/м ³	±0,02 кг/м ³	0,004 кг/м ³

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные исследования метрологических характеристик CastAway-CTD проводились на прецизионном калибровочном оборудовании «Установка для измерения УЭП морской воды ВНИРО» (свидетельство об утверждении типа средства измерений RU.E.31.001.A № 42535) (Установка) [Рамазин и Левашов, 2016]. В тестовых экспериментах использовали два экземпляра Castaway-CTD.

Основной испытательный модуль Установки – термобак модель 7051А фирмы «Hart Scientific» ёмкостью 216 л был заполнен отфильтрованной искусственной морской водой «Red Sea Salt» (Израиль) солёностью 34,2 [Рамазин, 2016]. При диапазоне изменения температуры от –1,6 до 30 °С её УЭП варьировала в пределах от 27 до 57 мСм/см. В начале эксперимента вода в термобак для дегазации нагревалась до температуры 32,5 °С, выдерживалась на этом уровне в течение часа, а затем охлаждалась до температуры 30 °С.

Температурный режим в термобаке контролировали с помощью стандартного платинового термометра сопротивлений (СПТС) 25,5 Ом, являющегося рабочим эталоном 0 разряда, расширенная (при ширине охвата $K=2$) неопределённость СПТС U_{TO} , составляет 0,1 мК в тройной точке воды (0,0100°C), 0,24 мК – в точке плавления галлия (29,7646°C) и 0,5 мК – в точке плавления ртути (–38,8344°C).

Сопротивление СПТС измерялось прецизионным мостом сопротивлений F18, расширенная неопределённость которого при ширине охвата $K=2$ составляет

$U_M^R = 2 \cdot 10^{-5}$ Ом, и эталонной катушки сопротивления 100 Ом, расширенная ($K=2$) относительная неопределённость которой $\delta U_{ЭК} = 1 \cdot 10^{-7}$.

Значения УЭП морской воды в баке измерялись с помощью эталонной семиэлектродной ячейки калибратора СТ01 «Idronaut», входящего в состав Установки. Относительная расширенная ($K=2$) стандартная неопределённость ячейки не превышает 0,004% [Рамазин, 2021].

Приборы погружали в термобак при стабилизированных уровнях температуры воды: 30; 25; 20; 15; 10; 5; 1 и –1,6 °С, которым соответствовали значения УЭП: 57; 52; 47; 42; 37; 33; 29 и 27 мСм/см. Уровень нестабильности в каждой точке удерживался в пределах ±0,001 °С и ±0,001 мСм/см.

Зонд размещали в термобаке таким образом, чтобы его датчики были максимально приближены к СПТС и эталонным ячейкам.

Так как исследуемая модель CastAway-CTD имеет ограниченный ресурс по электропитанию (две батарейки, тип AA), то в экспериментах использовали кратковременный режим регистрации зондом параметров воды. Каждый раз при достижении очередного стабилизированного значения температуры зонд погружался в термобак, нарушая стабильность температуры воды тем больше, чем значительнее тепловой контраст между его корпусом и водой. Режим регистрации данных запускали непосредственно перед погружением зонда и прерывали через 3 мин. после повторной стабилизации температуры и УЭП воды в баке, контролируя этот процесс по показаниям СПТС и эталонной ячейки. В экспериментах с незначительными контрастами (уровни 30–15 °С) продолжительность регистрации данных зондом составляла 5÷7 мин, и достигала 12 мин при значениях температурного фона от 10 до –1,6 °С. Пример данных, полученных CastAway-CTD при температуре воды в термобаке 15 °С

(корпус в момент погружения имел 21 °С), представлены на рис. 3а, б.

Во всех экспериментах с зондами CastAway-CTD конечные 3-минутные фрагменты реализаций $T(t)$ или $C(t)$ (далее $X_3 \sim \{T, C\}$), сформированные при относительной стабильности фоновых показателей тестируемой водной массы, тем не менее, содержат возмущения, вызванные процессом теплообмена между корпусом прибора и прилегающим водным слоем. Периодограммы – (спектральные плотности):

$$W_x(\Pi) = \int X_3(t) \cdot \exp(-2\pi i \cdot \Pi^{-1} \cdot t) dt, \quad (1)$$

рассчитанные для этих фрагментов, показали доминирование случайных процессов на масштабах до 2–4 с, и наличие возмущений с характерными периодами (Π) в диапазоне от 4 с до 1 мин, рис. 3в.

Принимая во внимание случайный характер возмущений на временных интервалах $\Delta t \leq 4$ с для оценки метрологических характеристик датчиков температуры и УЭП тестируемых экземпляров CastAway-CTD использовали выборки, содержащие по $n = 20$ отсчётов. Выборки определяли

из анализа конечных 30-секундных фрагментов реализаций $X_3(t)$, оптимально удовлетворяя аксиоме случайности (2), $\bar{x} \rightarrow 0$ и нормальности распределения вероятностей (3), $p(X) \approx p_{norm}(X)$:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{3i} - \bar{X}_3) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{3i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{3i}) = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$p_{norm}(X_3) = \frac{1}{s(X_3)\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(X_3 - \bar{X}_3)^2}{2s(X_3)^2}}, \quad (3)$$

где X_{3i} – i -е значение рассматриваемой выборки ($1 \leq i \leq n$) реализации $X_3(t)$, $x_i = X_{3i} - \bar{X}_3$ – функция аномалии, ограниченная временным интервалом Δt , а $s(X_3)$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) и $s(X_3)^2$ – дисперсия, установленные также на этом интервале:

$$s(X_3) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_{3i} - \bar{X}_3)^2}. \quad (4)$$

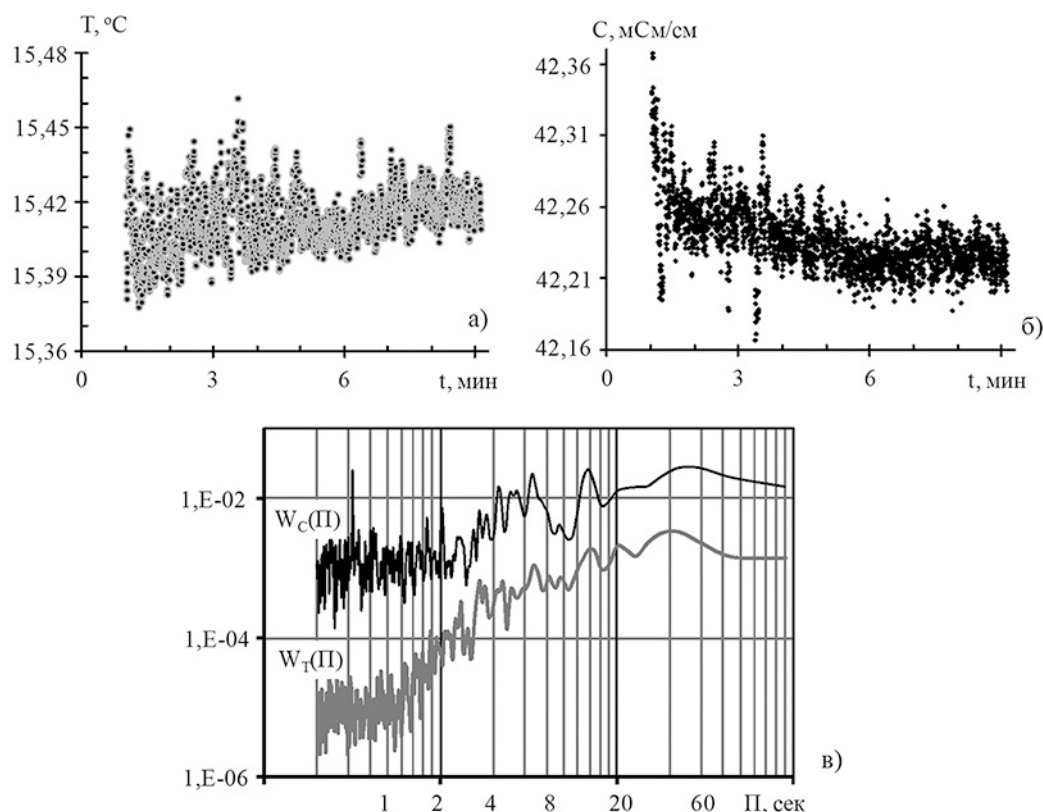


Рис. 3. Временные ряды температуры (а) и УЭП (б), измеренные CastAway-CTD при температуре воды в термобакке 15 °С. А также спектральные плотности $W_T(\Pi)$ и $W_C(\Pi)$ (1) конечных 3-минутных интервалов этих рядов (в)

Для оценки неопределённости результата калибровки датчиков температуры и УЭП CastAway-CTD в каждой точке (эксперименте) использовали суммарную стандартную неопределённость (СН) $u_{\Sigma(X)}$:

$$u_{\Sigma(X)} = \sqrt{(u_{\Sigma(X_3)})^2 + (u_{\Sigma(X(T))})^2 + (u_{\Sigma(X_3)})^2}, \quad (5)$$

где $u_{\Sigma(X_3)}$ – СН эталонных измерений температуры [Рамазин, 2018] и УЭП [Рамазин, 2021] в рабочей зоне термостата (см. табл. 2); $u_{\Sigma(X(T))}$ – СН, характеризующая неоднородность температурного поля и нестабильность поддержания температуры в рабочей зоне термобака; $u_{\Sigma(X_3)}$ – СН измерения калибруемого датчика зонда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

СН температурного поля в рабочей зоне термобака $u_{\Sigma(T)}$ (5) оценивали по типу В, учитывая его неоднородность u_{T1} и нестабильность u_{T2} :

$$u_{\Sigma(T)} = \sqrt{(u_{T1})^2 + (u_{T2})^2} = 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

при

$$u_{T1} = u_{T2} = \frac{b_+ - b_-}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,001 - (-0,001)}{2 \cdot \sqrt{3}} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где b_+ и b_- – границы распределений неравномерности и нестабильности температурного поля, носящие равновероятный характер.

Полученные оценки характеристик температурного поля (6, 7) также применили при расчёте СН поля УЭП $u_{\Sigma(C(T))}$:

$$u_{\Sigma(C(T))} = u_{\Sigma(T)} \cdot \frac{\partial C}{\partial T}, \quad (8)$$

где $\partial C / \partial T$ – коэффициент чувствительности измерения УЭП морской воды в термобаке:

$$\frac{\partial C}{\partial T} \approx \frac{\partial C(35, T, 0)}{\partial T} = (c_1 + 2c_2 T_{68} + 3c_3 T_{68}^2 + 4c_4 T_{68}^3) \cdot C(35, 15, 0), \quad (9)$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты уравнения зависимости УЭП стандартной морской воды (IAPSO Standard Seawater) от температуры T_{68} международной практической шкалы температуры 1968 г (МПШТ-68) [Perkin, Lewis, 1980]. Результаты выполненных вычислений (9 и 8) помещены в табл. 2.

СН измерений температуры и УЭП датчиком зонда $u_{\Sigma(X_3)}$ в рабочей зоне термостата рассчитывали по формуле:

$$u_{\Sigma(X_3)} = \sqrt{(u_{AX_3})^2 + (u_{AXCK})^2 + (u_{BX_3})^2}, \quad (10)$$

где u_{AX_3} , u_{AXCK} – оценки неопределённости по типу А и u_{BX_3} – по типу В.

По результатам экспериментов с зондами CastAway-CTD стандартную неопределённость (СН) u_{AX_3} , оцениваемую по типу А, находили из выражения:

$$u_{AX_3} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{3i} - \bar{X}_3)^2} = \frac{s(X_3)}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

используя выборки исходных рядов $X_3(t)$ ($X_3 \sim \{T, C\}$), установленные ранее из анализа (2, 3), т. е. при $n=20$.

Компоненту u_{AXCK} в формуле (10) оценивали, используя стандартное отклонение корректирующего уравнения (общее уравнение калибровки) вида $X_{CK} = f(\bar{X}_3)$ от усреднённых значений показаний эталона X_3 , формула (15). Другую аддитивную составляющую (10) u_{BX_3} оцениваемую по типу В, определяли по формуле:

$$u_{BX_3} = \frac{\Delta X_3}{\sqrt{3}}, \quad (12)$$

учитывая ΔX_3 – дискретность показаний соответствующего датчика зонда.

Для оценки входных измеряемых величин и определения поправок на систематические эффекты использовали величины расхождений между усреднёнными (на тождественных временных интервалах $\Delta t = 4$ с) показаниями рабочих эталонов \bar{X}_3 и соответствующих датчиков тестируемых приборов:

$$\Delta \bar{X} = \bar{X}_3 - \bar{X}_3. \quad (13)$$

Результаты сравнения $\Delta X_3(T)$ (13) по двум сериям экспериментов с профилографами CastAway-CTD представлены на рис. 4а. Расхождения $\Delta \bar{T}(T)$, полученные в пределах диапазона $-1,6 \leq T \leq 30$ $^\circ\text{C}$, демонстрируют практически одинаковые тренды: для 1-го экземпляра положительный уход на величину от 0,36 до 0,23 $^\circ\text{C}$, а для 2-го – от 0,41 $^\circ\text{C}$ до 0,20 $^\circ\text{C}$. Систематические отклонения в показаниях терморезисторов тестируемых зондов CastAway-CTD, учитывая даты их изготовления, соответствуют временному дрейфу 0,04÷0,08 $^\circ\text{C}/\text{год}$. Аналогичный результат получен из анализа показаний датчика УЭП 1-го зонда, а именно, при наличии положительного тренда $0,10 \leq \Delta \bar{C}_1(T) \leq 0,39$ мСм/см имеем временной дрейф 0,02÷0,08 мСм/см/год. Расхождения (13) в показаниях датчика

Таблица 2. Бюджет неопределённости откорректированных по формуле (15) измерений термистора и ячейки УЭП 2-го экземпляра Castaway-CTD для диапазона $-1,6 \leq T \leq 30$ °C и $27 \leq C \leq 57$ мСм/см

Температура морской воды в термобаке (СПТС), °C	29,808	24,883	19,996	15,113	10,168	5,084	0,825	-1,629
СН СПТС $U_{\Sigma T(T)} \cdot 10^{-3}$ °C	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,13
СН поля температуры в рабочей зоне термобака $U_{\Sigma T(T)} \cdot 10^{-3}$ °C	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$u_{AT3} \cdot 10^{-3}$ °C (11)								
$n=20$	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	2,7	2,2	3,1
$u_{A(TCK)} \cdot 10^{-3}$ °C (16)								
$n=20$	6	6	6	6	6	6	6	6
$u_{BT3} \cdot 10^{-3}$ °C	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
$u_{\Sigma T3}$ °C, ($n=20$)	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
$u_{\Sigma(T)} = \sqrt{(u_{\Sigma T(T)})^2 + (u_{\Sigma T(T)})^2 + (u_{\Sigma T3})^2}$ (10)								
$u_{\Sigma(T)}$ °C, ($n=20$)	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
$U_{\Sigma(T)}$ °C, ($n=20$)	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
УЭП морской воды в баке, мСм/см	57,005	51,913	46,975	42,182	37,491	32,862	29,152	27,089
СН эталонной ячейки $u_{\Sigma C(C)} \cdot 10^{-3}$ мСм/см	–	1,12	1,15	1,00	0,73	0,58	0,62	0,67
СН поля УЭП в рабочей зоне термобака, $u_{\Sigma C(T)} \cdot 10^{-3}$ мСм/см	0,88	0,85	0,84	0,80	0,78	0,75	0,71	70
$u_{AC3} \cdot 10^{-3}$ мСм/см (11)								
$n=20$	2,5	2,5	1,8	2,2	2,7	3,8	3,8	6,5
$u_{A(CCK)} \cdot 10^{-3}$ мСм/см (16)								
$n=20$	16	16	16	16	16	16	16	16
$u_{BC3} \cdot 10^{-3}$ мСм/см	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
$u_{\Sigma C3}$ мСм/см, ($n=20$)	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017
$u_{\Sigma(C)} = \sqrt{(u_{\Sigma C(C)})^2 + (u_{\Sigma C(T)})^2 + (u_{\Sigma C3})^2}$ (10)								
$u_{\Sigma(C)}$ мСм/см, ($n=20$)	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017
$U_{\Sigma(C)}$ мСм/см, ($n=20$)	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,034
$\delta U_{\Sigma(C)}$, %	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12

УЭП 2-го зонда небольшие и лежат в пределах от 0 до 0,09 мСм/см.

Особенностью выявленных трендов систематических отклонений в показаниях терморезисторов и ячеек обоих зондов является наличие изгибов графиков $\Delta X_3(T)$ в разные стороны на концах исследуемых диапазонов измерения (рис. 4а), характерных для кривых 3-го порядка (из общей закономерности выпадает только точка ΔC_2 (10 °C).

Для устранения выявленных систематических эффектов в показаниях тестируемых профилографов CastAway-CTD использовали уравнения:

$$X_{CK}(X) = a + bX; \quad (14)$$

$$X_{CK}(X) = a + bX + cX^2 + dX^3, \quad (15)$$

с целью оценки эффективности применения кубических зависимостей (15) по сравнению с линейными (14). На рис. 4б, в представлены графики расхождений $\Delta \bar{X}(X)$ (13) после применения корректирующих уравнений (14 и 15).

Рассчитанные после устранения линейных трендов (14) стандартные отклонения:

$$s(X_{CK}) = \sqrt{\frac{1}{(k-1)} \cdot \sum_{i=1}^k (\bar{X}_{\Delta i} - \bar{X}_{CKi})^2} \quad (16)$$

понижились на порядок: в показаниях терморезистора и ячейки первого зонда (при количестве

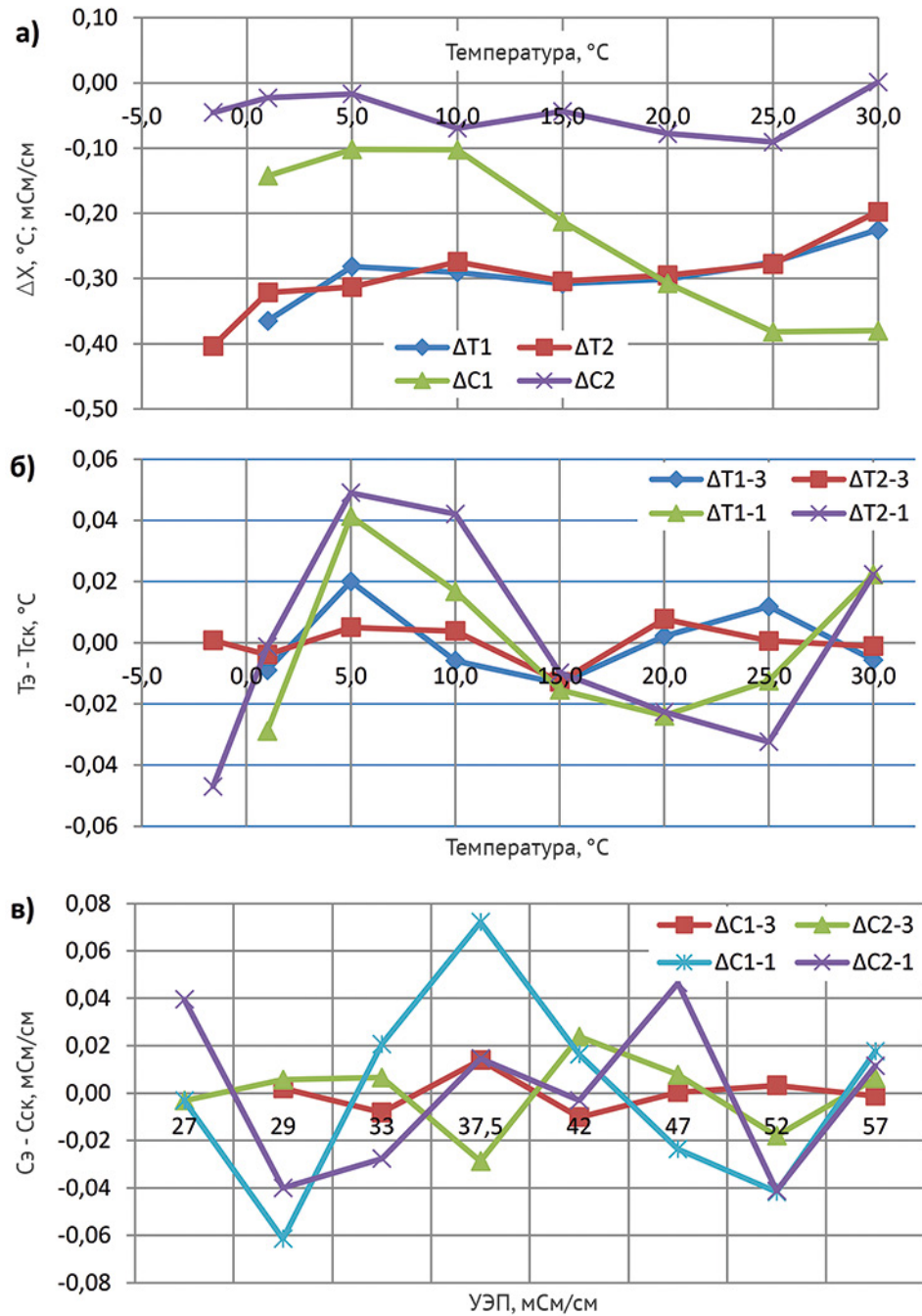


Рис. 4. Графики сравнения (13) показаний рабочих эталонов и данных тестируемых CastAway-CTD: а) – до коррекции температуры – 1-го ($\Delta T1$), 2-го ($\Delta T2$) зондов и УЭП – 1-го ($\Delta C1$) и 2-го ($\Delta C2$) зондов; б) – после коррекции показаний терморезистора уравнениями 1-го порядка ($\Delta T1-1$, $\Delta T2-1$), 3-го порядка ($\Delta T1-3$, $\Delta T2-3$) и в) – после коррекции показаний датчиков УЭП уравнениями 1-го порядка ($\Delta C1-1$, $\Delta C2-1$), 3-го порядка ($\Delta C1-3$, $\Delta C2-3$)

экспериментов $k=7$) до $0,027 ^\circ\text{C}$ и $0,042 \text{ мСм/см}$, а для второго ($k=8$) – $0,035 ^\circ\text{C}$ и $0,036 \text{ мСм/см}$, соответственно. Результаты коррекции экспериментальных данных обоих зондов CastAway-CTD с использованием уравнения (15) показали большую эффективность: $s(T_{3_1})=0,012 ^\circ\text{C}$, $s(C_{3_1})=0,008 \text{ мСм/см}$ и $s(T_{3_2})=0,006 ^\circ\text{C}$, $s(C_{3_2})=0,016 \text{ мСм/см}$.

Для удобства последующего анализа неопределённости результатов испытаний тестируемых экземпляров CastAway-CTD, откорректированных по формуле (15), полученные оценки, учитывая их разнородность и множественность, были сведены в табл. 2.

Из представленного бюджета неопределённости результатов тестирования 2-го экземпляра

CastAway-CTD на лабораторной установке, табл. 2, следует, что оценки стандартной неопределённости (СН), рассчитанные по типу А (11) для датчиков температуры $u_{AT\bar{z}}$ и УЭП $u_{AC\bar{z}}$, находятся в интервалах $(0,7 \div 3,1) \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $(0,3 \div 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ мСм/см}$, соответственно. А оценки СН-отклонений по принятым корректирующим уравнениям (15) тождественны расчётным величинам СКО (16): $u_{A(TCK)} = 0,006 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $u_{A(CCK)} = 0,016 \text{ мСм/см}$.

Расширенную суммарную стандартную неопределённость результатов испытаний u_{Σ} по каждому датчику оценивали при уровне доверия 0,95:

$$U_{\Sigma(X)} = K \cdot u_{\Sigma(X)}, \quad (17)$$

где $K=1,96$ – коэффициент охвата, определяемый по формуле Велча-Саттерсвейта для всех калибруемых CTD-зондов как коэффициент Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_{eff} , близким к ∞ [Руководство, 1999]. Для датчиков 1-го экземпляра CastAway-CTD оценки расширенной ССН не превысили $U_{\Sigma(T)} = 0,024 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $U_{\Sigma(C)} = 0,016 \text{ мСм/см}$, а для 2-го – $U_{\Sigma(T)} = 0,012 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $U_{\Sigma(T)} = 0,032 \text{ мСм/см}$. При этом относительная расширенная ССН-датчика УЭП 2-го экземпляра варьирует от 0,06 до 0,12% при росте УЭП от 27 мСм/см до 57 мСм/см, соответственно (табл. 2).

Таким образом, испытания показали, что в диапазоне изменений температуры $-1,6 \leq T \leq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и УЭП $27 \leq C \leq 57 \text{ мСм/см}$ полученные оценки расширенной неопределённости датчиков температуры и УЭП тестируемых экземпляров зонда CastAway-CTD находятся в пределах значений «ассигасу», заявленных производителем.

Вместе с тем, в процессе эксперимента удалось выявить ряд факторов, влияние которых способно внести большую неопределённость как в результаты калибровки, так и в результаты измерения.

В процессе испытаний зонд, имеющий температуру лабораторного помещения, опускали в морскую воду с относительно более низкой или высокой температурой. Через определённый промежуток времени по показаниям СПТС фиксировался необходимый уровень стабилизации температуры воды в термобакке ($\pm 0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}$), характеризующий отсутствие вносимых корпусом зонда температурных искажений в зоне калибровки.

Используемые в экспериментах условия испытаний, которые соответствуют предельно высоким уровнями пространственно-временной однородности основных параметров водной сре-

ды, ранее обеспечивали эффективную калибровку различных моделей CTD-зондов [Рамазин, 2016]. Однако, для испытуемых зондов CastAway-CTD эти условия оказались недостаточными, т. к. способ перемешивания воды в баке не обеспечивал требуемого динамического режима, скорости потока морской воды, направленного через проточный канал блока датчиков, не превышали $0,15 \text{ м/с}$ и отличались кратно от рекомендованной $V \approx 1 \text{ м/с}$. В экспериментах со значительными температурными контрастами между корпусом зонда и водой в баке этот недостаток проявился в виде аномалий в показаниях терморезистора и ячейки УЭП.

На рис. 5 представлены характерные распределения температуры и УЭП на конечных 3-минутных интервалах регистрации данных в экспериментах при незначительном и ярко выраженном тепловых контрастах.

В эксперименте со вторым экземпляром CastAway-CTD, который выполнялся при $T_{СПТС} \approx 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и тепловом контрасте в начальный момент $\Delta T(0) = T_z(0) - T_{СПТС} \approx 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, флуктуации $x(t)$ (отклонения от среднего значения) (2) представленных фрагментов реализаций $T_z(t)$ или $C_z(t)$ (рис. 5а, в) варьировали в пределах $\pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\pm 0,03 \text{ мСм/см}$ при СКО (4) $0,004 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,013 \text{ мСм/см}$, соответственно. Ряды аналогичных флуктуаций, полученные при большем на порядок контрасте $\Delta T \approx 16,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5б, г), показали не только многократный рост средних уровней до $\pm 0,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\pm 0,07 \text{ мСм/см}$, но и аномалии, в несколько раз их превышающие, $0,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,20 \text{ мСм/см}$.

Дестабилизирующий эффект при наличии термического контраста в системе «корпус зонда – вода», влияющий на качество показаний терморезистора и ячейки УЭП CastAway-CTD, подтверждается результатами статистического анализа данных лабораторных экспериментов. При анализе использовали свойство СКО измерений стационарных процессов, которые характеризуются нормальным законом распределения случайных величин, а именно, приблизительное равенство значений СКО флуктуаций не зависимо от используемого числа измерений. Для данных, полученных в экспериментах со вторым экземпляром зонда, значения СКО флуктуаций определялись по выборкам $X_z(n)$, содержащим по 20, 50 и 900 измерений, что соответствует временным интервалам 4 с, 10 с и 3 мин.

Из графиков $s(T_z)$, представленных на рис. 6а, следует, что в диапазоне изменения температуры

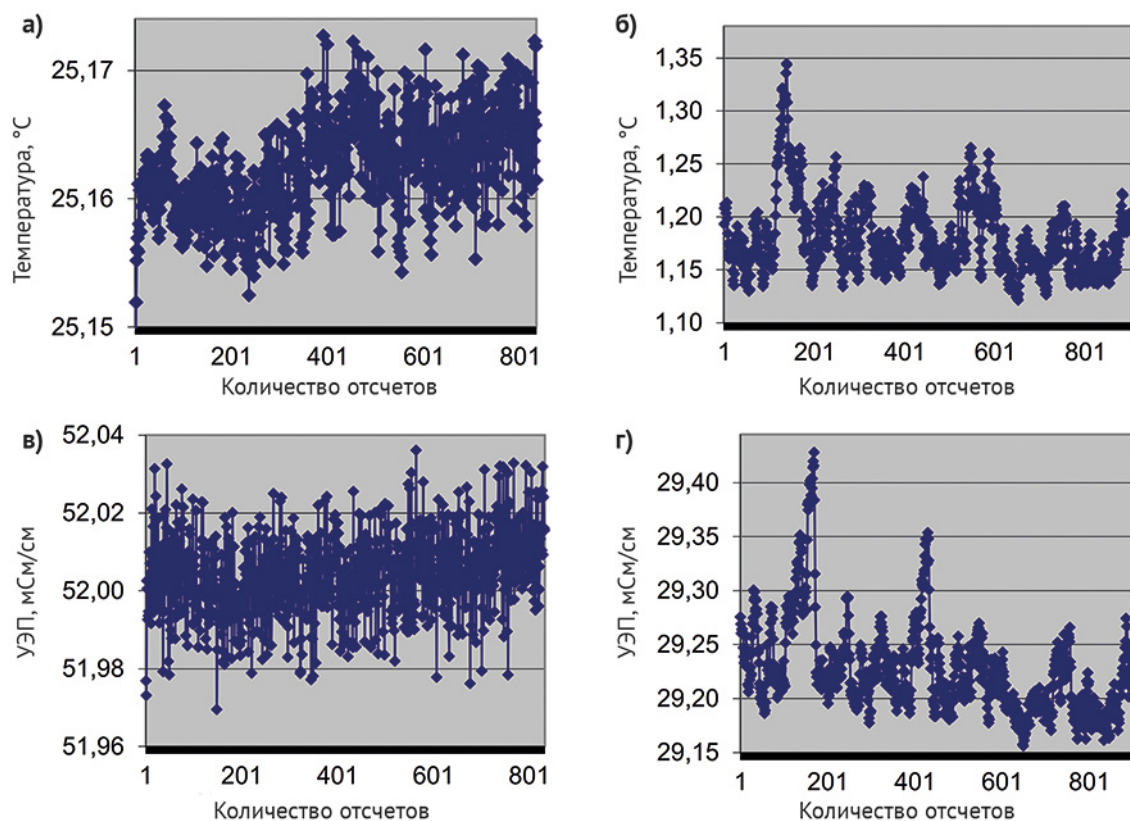


Рис. 5. Ряды температуры $T_z(t)$ и УЭП $C_z(t)$, измеренные терморезистором и ячейкой УЭП CastAway-CTD (экземпляр № 2) на конечных 3-минутных временных интервалах в экспериментах с температурой воды в термобаке 25 °С (а, в) и 1 °С (б, г)

от 15 до 25 °С значения СКО флуктуаций терморезистора практически не зависят от длины выборки и не превышают уровень чувствительности, заявленный производителем 0,01 °С (табл. 1). А значения СКО флуктуаций датчика УЭП $s(C_z)$, рис. 6б, рассчитанные в том же диапазоне лежат в интервале $0,008 \div 0,013$ мСм/см.

По мере снижения температурного фона в тестовых экспериментах, начиная с 10 °С, значения СКО флуктуаций в показаниях обоих датчиков возрастают вне зависимости от размеров выборок, достигая максимальных значений при осреднениях по 3-минутным интервалам: $s(T_z) = 0,036$ °С при 1 °С и $s(C_z) = 0,044$ мСм/см при 5 и 1 °С.

Таким образом, при наличии в процессе калибровки зонда эффекта тепловой инерционности его корпуса наблюдаются завышенные уровни СКО флуктуаций в показаниях датчиков, которые, соответственно, уменьшают меру прецизионности полученного результата [Рекомендации по стандартизации Р50.01.097–2014, 2015].

Влияние корпуса зонда CastAway CTD на показания его основных датчиков также демон-

стрируют данные натурных измерений, выполненных со льда Амурского залива в 2018 и 2019 гг., рис. 7. В эксперименте 6 февраля 2019 г. использовались три CTD-зонда различных моделей: один SBE 19plus и два CastAway CTD. Эти приборы в связанном виде, вынутые из тёплого салона автомобиля, были погружены в полынью на глубину 6 м и находились в неподвижном положении в течение часа. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 7а.

Из графиков $T(t)$ или $C(t)$, полученных в этом эксперименте, следует, что показания терморезистора и ячейки УЭП двух зондов CastAway CTD только в самом конце эксперимента (после 45 мин пребывания в воде) максимально приблизились к соответствующим значениям параметров окружающей их воды, зафиксированных зондом SBE 19plus. При этом они продолжали флуктуировать, по-видимому, за счёт эффекта «нагрева» током питания терморезистора окружающего его незначительного объёма воды» [А-8. Overview of Available, 2010].

Таким образом, температурную инерционность корпуса зонда, по проточному каналу кото-

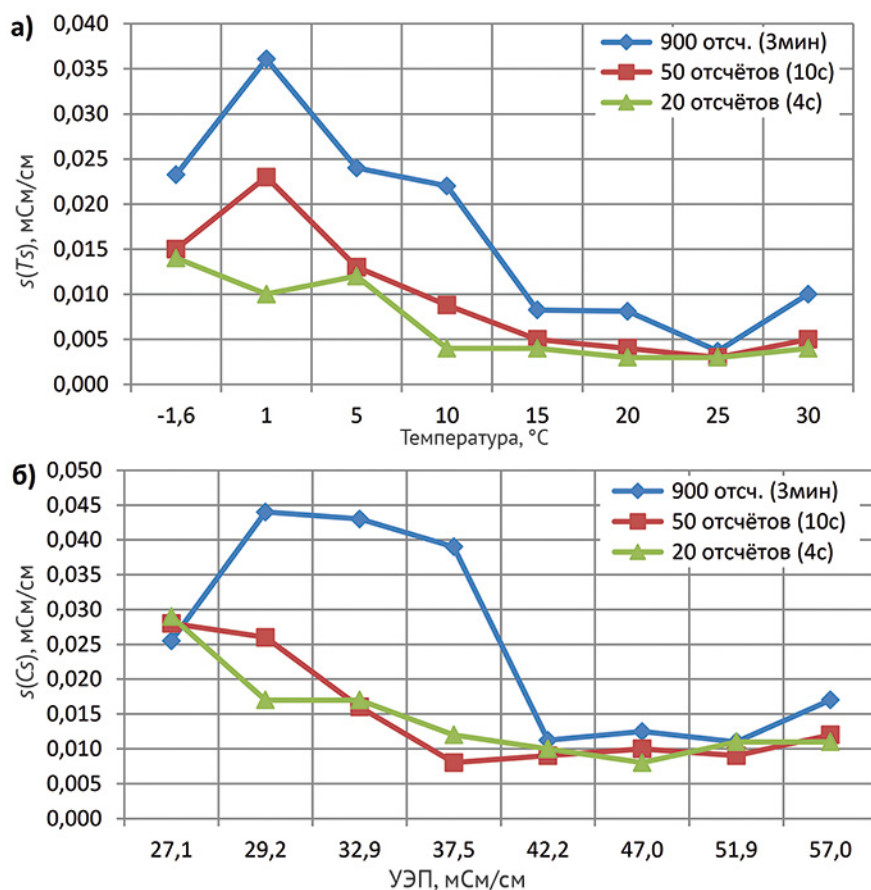


Рис. 6. СКО (4) показаний датчиков температуры (а) и УЭП (б), рассчитанные по выборкам с различным количеством данных, полученных в серии экспериментов со 2-м экземпляром CastAway-CTD

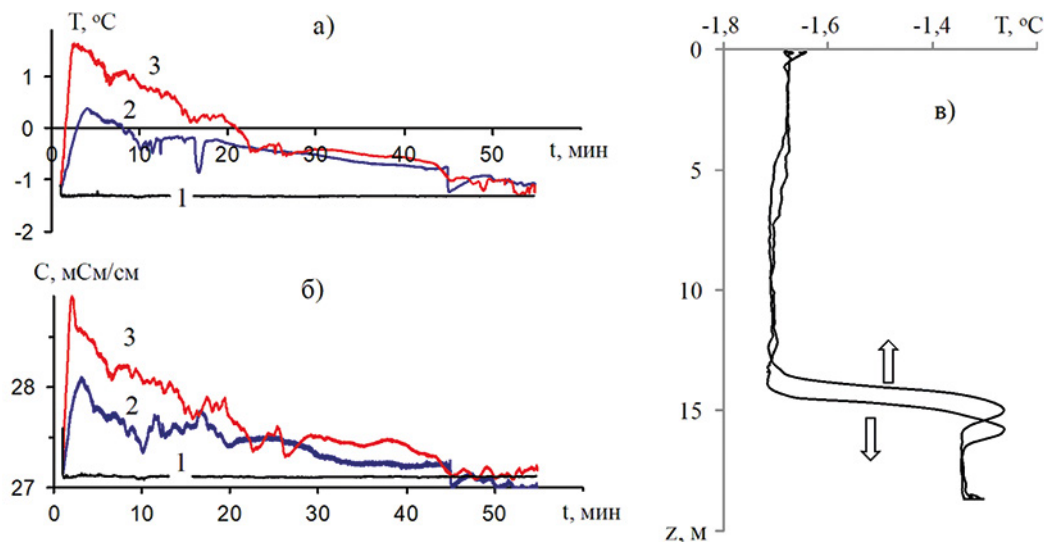


Рис. 7. Временные ряды показаний датчиков температуры (а) и УЭП (б) моделей CTD-зондов SBE 19plus (1) и 2-х экземпляров CastAway CTD (2 и 3), полученные в эксперименте со льда Амурского залива 6 февраля 2019 г; в) – профили температуры, полученные при спуске и подъёме CastAway CTD при работах со льда Амурского залива 19 января 2018 г.

рого, минуя чувствительные элементы датчиков, проходит исследуемая морская вода, следует рассматривать в качестве одной из значимых метрологических характеристик CastAway CTD. Для минимизации эффекта тепловой инерции производитель зонда предлагает использовать его с максимально возможной скоростью зондирования — в режиме свободного падения. В этом случае, поток воды в проточном канале зонда будет интенсивнее охлаждать примыкающую к нему внутреннюю часть корпуса, понижая тем самым его тепловую инерционность. Однако, и в этом случае инерционность корпуса не снижается полностью. Профили температуры (рис. 76), полученные со скоростью 1–1,2 м/с при спуске и подъёме CastAway CTD во время работ со льда Амурского залива 19 января 2018 г., демонстрируют характерный для инерционных датчиков гистерезис. В рекомендациях по обработке данных зондирования производитель предлагает усреднять измерения, полученные при движении прибора вниз и вверх [A-8. Overview of Available, 2010]. В результате получается усреднённый профиль измеряемого параметра, нивелирующий характерные структурные неоднородности исследуемой стратификации.

При тестированиях профилографа CastAway CTD в лабораторных условиях, снижения эффекта тепловой инерции его корпуса можно добиться путём подключения к входному отверстию проточного канала помпы, позволяющей увеличить интенсивность потока исследуемой воды через проточный канал блока датчиков зонда. Это одновременно позволит термистору проводить измерения температуры в рабочем режиме без тепловых искажений, вызванных эффектом «нагрева током питания».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные исследования метрологических характеристик двух экземпляров зонда «YSI CastAway-CTD», выполненные на прецизионном калибровочном оборудовании «Установка для измерения УЭП морской воды ВНИРО» при диапазонах изменения температуры от –1,6 до 30 °C и УЭП от 27,1 до 57,2 мСм/см, показали следующее:

1. Наличие в данных терморезисторов обоих зондов систематических отклонений, которые варьировали от 0,36 до 0,23 °C у 1-го экземпляра, и от 0,41 °C до 0,20 °C — у 2-го. Эти отклонения соответствуют временному дрейфу $0,04 \div 0,08$ °C/год.

Аналогичный результат установлен для датчика УЭП 2-го зонда: тренд $0,10 \div 0,39$ мСм/см и дрейф $0,020 \div 0,076$ мСм·см⁻¹/год. Систематический уход показаний датчика УЭП 1-го зонда относительно показаний эталонной ячейки был незначительным, варьировал от 0 до 0,09 мСм/см и не выходил за пределы, заявленные изготовителем.

2. Оценки суммарных стандартных неопределённостей (СН) показаний датчиков температуры и УЭП исследуемых профилографов CastAway-CTD, полученные после дополнительной коррекции уравнениями 3-го порядка, соответствуют значениям, заявленным производителем. Для 1-го экземпляра оценки расширенной СН составили 0,024 °C и 0,016 мСм/см, а для 2-го — 0,012 °C и 0,032 мСм/см.

Лабораторные и натурные эксперименты с зондами CastAway-CTD выявили ряд факторов, влияние которых при определённых условиях способно внести значительный вклад в СН результатов калибровки и измерения.

Это связано с особенностями конструкции его измерительного блока, чувствительные элементы которого, терморезистор и электроды ячейки УЭП, расположены внутри узкого и длинного проточного канала, проходящего внутри тела корпуса зонда. Соответственно в процессе измерения имеет место теплообмен с проходящими через канал порциями морской воды, который приводит к увеличению неопределённости измерений.

Неизбежный рост оценок СН данных CastAway-CTD возникает:

- при значительных температурных контрастах между корпусом зонда и исследуемой средой;
- при низких скоростях зондирования либо условиях перемешивания воды в термобаке, не обеспечивающих необходимый динамический режим;
- в силу недостаточной промываемости кондуктивной ячейки [Fozdar 1985].

Обнаруженный фактор инерционности корпуса зонда при наличии теплового контраста не повлиял на оценки СН результатов тестирования экземпляров CastAway-CTD. Понизить тепловой эффект корпуса (например, при последующих калибровках) возможно подключением к входному отверстию проточного канала помпы, которая обеспечит интенсивность потока морской воды через блок датчиков со скоростью 1 м/с.

Тепловая инерционность корпуса зонда CastAway-CTD, гидродинамическое сопротивление ячейки УЭП и её низкая промываемость являются факторами, исключающими адекватное разрешение особенностей тонкой структуры при профилировании.

Профилографы CastAway-CTD при условии регулярной поверки и калибровки (не реже одного раза в год) могут быть эффективны при выполнении гидрологических съёмок по определению фоновых распределений температуры и солёности с указанной неопределённостью. Эту модель также можно рекомендовать для использования при проведении студенческих практик и для решения ограниченного перечня исследовательских задач.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 54500.3–2011. Руководство ИСО/МЭК 98–3:2008. 2012. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. М.: Стандартинформ. 101 с. Accessible via: <https://megaporm.ru/Index2/1/4293792/4293792084.htm> 07.11.2019.
- Архипкин В.С., Лазарюк А.Ю., Левашов Д.Е., Рамазин А.Н. 2009. Океанология: инструментальные методы измерения основных параметров морской воды. М.: МАКС Пресс Москва. 336 с.
- Лазарюк А.Ю. 2009. Динамическая коррекция CTD-данных // Подводные исследования и робототехника. № 2 (8). С. 59–71.
- Походун А.И. 2006. Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределённости измерений. СПб: СПбГУ ИТМО. 112 с.
- Рамазин А.Н. 2016. Некоторые научно-методические аспекты метрологического обеспечения измерений электропроводности и температуры морской воды с помощью CTD-зондов // Труды ВНИРО. Т. 159. С. 167–182.
- Рамазин А.Н. 2018. Оценка неопределённости калибровки и измерений датчиков температуры CTD-зондов «Sea Bird» // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2018. Вып.14 (34). С. 33–42.
- Рамазин А.Н. 2021. Оценка неопределённости калибровки эталонной ячейки электропроводности калибратора T01 «Idronaut» «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО» // Труды ВНИРО. Т. 184. С. 99–111.
- Рамазин А.Н., Левашов Д.Е. 2016. Методические рекомендации по калибровке и метрологическому обеспечению измерителей параметров водной среды. М.: Изд-во ВНИРО. 127 с.
- Рекомендации по стандартизации Р50.01.097–2014. 2015. Статистические методы. Примеры измерений при анализе повторяемости и воспроизводимости. М.: Стандартинформ. 2015. 34 с.
- A-8. Overview of Available. CastAway-CTD User's Manual, 2010. Accessible via: https://www.fondriest.com/pdf/ysi_castaway_manual.pdf. 28.09.2019.
- CastAway-CTD User's Manual, 2010. Accessible via: <http://www.xylemanalytics.com.au/media/pdfs/ysi-castaway-ctdprinciples-of-operation.pdf>. 24.10.2019.
- Fozdar F.M., Parker G.J., Imberger J. 1985. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics // J. Physical Oceanography. V. 15, p. 1557–1569.
- Giles A.B., McDougall T.J. 1986. Two methods for the reduction of salinity spiking of CTD's // Deep-Sea Res. V. 33. № 9. P. 1253–1274.
- IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides 56, UNESCO (English), 196 pp. Accessible via: http://www.teos-10.org/TEOS-10_Manual.pdf. 20.08.2019.
- Fofonoff N.P., Millard R.C. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, UNESCO technical papers in marine science 44, 53 pp.
- Morison J., Andersen R., Larson N., D'Asaro E., Boyd T. 1994. The correction for thermal-lag effects in Sea-Bird CTD Data // J. Atmos. Oceanic Technol., 11, 1151–1164.
- Trump C.L. 1983. Effects of ship's roll on the quality of precision CTD data // Deep-Sea Res. V. 30. No. 11A. P. 1173–1183.
- WGS84 Ellipsoid Gravity Formula, Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA TR8350.2, 3rd edition amendment 1, January 2000, Technical Report pages 3–5 to 4–2. Accessible via: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/tr8350_2.htm. 24.10.2019.
- UNESCO technical papers in marine science. 1988. UNESCO. V. 54. 94 p.

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.
Принята после рецензии 10.01.2020 г.

The results of studies of metrological characteristics YSI CastAway-CTD profilograph

A.N. Ramazin¹,
A. Yu. Lazaryuk²

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, Russia

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute («POI FEB RAS»), Vladivostok, Russia

The results of laboratory experiments to study the metrological characteristics of the YSI CastAway-CTD profilograph are discussed. The factors determining the combined standard uncertainty (CSU) of the calibration of temperature and conductivity sensors are considered. Systematic deviations in CastAway-CTD sensor readings are determined and the temporal drift limits of their calibration characteristics are estimated. To eliminate the systematic effect in the temperature and conductivity data, correcting equations of the third order were used. Estimates of the expanded CSU after correcting the CTD data (the ranges: $-1.6 \leq T \leq 30$ °C and $27 \leq C \leq 57$ mS/cm) did not exceed the values stated by the manufacturer. It is shown that the CastAway-CTD data is affected by the thermal inertia of its body (TIB), therefore TIB is an important metrological characteristic of the profilograph, which can distort the stratification of the studied water masses.

Keywords: CTD profiler, standard, combined, expanded uncertainty, temporal drift, sensors, temperature contrast, flow channel.

REFERENCES

- GOST R 54500.3–2011. Rukovodstvo ISO/MEK 98–3:2008. Neopredelennost' izmereniya. CHast' 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya [Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement]. M.: Standartinform. 101 s. Accessible via: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293792/4293792084>. 07.11.2019.
- Arhipkin V.S., Lazaryuk A. Yu., Levashov D.E., Ramazin A.N. 2009. Okeanologiya: instrumental'nye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoy vody [Oceanology: instrumental methods for measuring the basic parameters of sea water]. M.: MAKSS Press Moskva. 336 s.
- Lazaryuk A. Yu. 2009. Dinamicheskaya korrektsiya STD-dannykh [Dynamic correction of CTD data] // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. № 2 (8). S. 59–71.
- Pohodun A.I. 2006. Eksperimental'nye metody issledovaniy. Pogreshnosti i neopredelennosti izmereniy. Uchebnoe posobie [Experimental research methods. Errors and measurement uncertainties]. SPb: SPbGU ITMO. 112 s.
- Ramazin A.N. 2016. Nekotorye nauchno-metodicheskie aspekty metrologicheskogo obespecheniya izmereniy elektroprovodnosti i temperatury morskoy vody s pomoshch'yu STD-zondov [Some scientific and methodological aspects of metrological supply of conductivity and sea water temperature measurements with CTD-probes] // Trudy VNIRO. T. 159. S. 167–182.
- Ramazin A.N. 2018. Ocenka neopredelyonnosti kalibrovki i izmereniy datchikov temperatury CTD-zondov «Sea Bird» [Evaluation of calibration and measurement uncertainty of temperature sensors of CTD-probe «Sea Bird»] // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. Sevastopol': IPTS. Vyp.14 (34), S.33–42.
- Ramazin A.N. 2021. Ocenka neopredelyonnosti kalibrovki etalonnogo yachejki elektroprovodnosti kalibratora ST01 «Idronaut» «Ustanovki dlya izmereniya UEP morskoy vody VNIRO» [Evaluation of calibration uncertainty reference conductivity cell of calibrator CT01 «Idronaut» "Installations for measuring specific electrical conductivity of sea water VNIRO"] // Trudy VNIRO. T. 184. S. 99–111.
- Ramazin A.N., Levashov D.E. 2016. Metodicheskie rekomendatsii po kalibrovke i metrologicheskomu obespecheniyu izmeritelej parametrov vodnoy sredy [Guidelines for calibration and metrological support of measuring instruments for the parameters of the aquatic environment]. M.: Izd-vo VNIRO. 127 s.
- Rekomendatsii po standartizatsii R50.01.097–2014. 2015. Statisticheskie metody. Primery izmerenij pri analize povtoryaemosti i vosproizvodimosti [ISO/TR 12888:2011. Selected illustrations of gauge repeatability and reproducibility studies (IDT)] // M. Standartinform. 2015. 34 s.
- A-8. Overview of Available. CastAway-CTD User's Manual, 2010. Accessible via: https://www.fondriest.com/pdf/ysi_castaway_manual.pdf. 28.09.2019.
- CastAway-CTD User's Manual, 2010. Accessible via: <http://www.xylemanalytics.com.au/media/pdfs/ysi-castaway-ctdprinciples-of-operation.pdf>, 24.10.2019.
- Fozdar F.M., Parker G.J., Imberger J. 1985. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics // J. Physical Oceanography. V. 15, p. 1557–1569.

- Giles A.B., McDougall T.J. 1986. Two methods for the reduction of salinity spiking of CTD's // Deep-Sea Res. V. 33. № 9. P. 1253–1274.
- IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides 56, UNESCO (English), 196 pp. Accessible via: http://www.teos-10.org/TEOS-10_Manual.pdf. 20.08.2019.
- Fofonoff N.P., Millard R.C. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, UNESCO technical papers in marine science 44, 53 pp.
- Morison J., Andersen R., Larson N., D'Asaro E., Boyd T. 1994. The correction for thermal-lag effects in Sea-Bird CTD Data // J. Atmos. Oceanic Technol., 11, 1151–1164.
- Trump C.L. 1983. Effects of ship's roll on the quality of precision CTD data // Deep-Sea Res. V.30. No. 11A. P. 1173–1183.
- WGS84 Ellipsoid Gravity Formula, Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA TR8350.2, 3rd edition amendment 1, January 2000, Technical Report pages 3–5 to 4–2. Accessible via: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/tr8350_2.htm. 24.10.2019.
- UNESCO technical papers in marine science. 1988. UNESCO. V. 54. 94 p.

FIGURE CAPTIONS

- Fig. 1.** CTD probe YSI CastAway-CTD: a) – appearance; b) – the probe in the process
- Fig. 2.** Dimensions and arrangement of CastAway-CTD sensors
- Fig. 3.** Temperature (a) and conductivity (б), measured by CastAway-CTD at water temperature 15 °C in a thermal tank. As well as the spectral densities $W_T(\Pi)$ and $W_C(\Pi)$ (1) of the final 3-minute interval of CTD data (б)
- Fig. 4.** Comparison (13) working standards and CTD data of two CastAway-CTD: a) – before data correction of temperature – 1st (ΔT_1), 2nd (ΔT_2) probes and conductivity – 1st (ΔC_1), 2nd (ΔC_2) probes; б) – after the thermistors data correction by equations 1st order (ΔT_1-1 , ΔT_2-1) and 3rd order (ΔT_1-3 , ΔT_2-3), and в) – after the conductivity cell data correction by equations of the 1st order (ΔC_1-1 , ΔC_2-1) and 3-th order (ΔC_1-3 , ΔC_2-3)
- Fig. 5.** Temperature $T_3(t)$ and conductivity $C_3(t)$, measured by CastAway-CTD (instance No. 2) at the final 3-minute intervals in experiments with the water temperature 25 °C (a, б) and 1 °C (б, з)
- Fig. 6.** Standard deviations (4) of the thermistor (a) and conductivity cell (б), calculated from a different samples of CTD data CastAway-CTD (instance No. 2)
- Fig. 7.** Temperature (a) and conductivity (б) measured by SBE 19plus (1) and two instances CastAway CTD (2 and 3) in the Amursky Bay on February 6, 2019; в) – temperature profiles of CastAway CTD (up and down casts), the Amursky Bay on January 19, 2018

TABLE CAPTIONS

- Table 1.** Metrological characteristics of the Castaway-CTD [CastAway-CTD User's Manual, 2010]
- Table 2.** Uncertainty budget of Castaway-CTD (instance No. 2) temperature and conductivity measurements of the corrected by formula (14) for the ranges $-1.6 \leq T \leq 30$ °C and $27 \leq C \leq 57$ mS/cm