

УДК 551.46

Некоторые научно-методические аспекты метрологического обеспечения измерений электропроводности и температуры морской воды с помощью СТД-зондов*А. Н. Рамазин*

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»)
e-mail: ramazin@vniro.ru

В практике океанологических исследований всё больше растёт спрос на метрологически обеспеченные натурные данные. Важное место среди них занимают данные автоматизированных средств измерения основных параметров морской воды: удельной электропроводности (УЭП), температуры и давления (СТД-зонды). Метрологической службой ФГБНУ «ВНИРО» отобраны средства метрологического обеспечения и определены научно-методические методы его использования, базирующиеся на принципах построения Международных шкалы температуры 1990 г. (МТШ-90) и Практической шкалы солёности 1978 г. (ПШС-78). Они легли в основу создания «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО» — комплекса метрологических средств калибровки, позволяющего осуществлять передачу единицы измерений от первичных государственных и международных эталонов к средствам измерения. На Установку для измерения УЭП морской воды ВНИРО выдано Свидетельство об утверждении типа средства измерений. Это позволило только с 2011 по 2015 гг. откалибровать 74 СТД-зонда повышенной точности фирм Sea Bird Electronics, Inc.; Falmouth Scientific, Inc.; Teledyne RD Instruments (США) и SAIV A/S (Норвегия). Приводятся результаты оценки метрологических характеристик отраслевых СТД-измерителей. Дано описание основных научно-методических принципов калибровки стандартного платинового термометра сопротивления (СПТС), образцовых ячеек измерения удельной электропроводности (УЭП), датчиков температуры и УЭП основных СТД-зондов, используемых в практике океанологических рыбохозяйственных исследований. Приведены данные исследования временной стабильности СПТС, тройной точки воды (ТТВ), точки плавления галлия (ТПГ). Сделан вывод о том, что СПТС, ТТВ и ТПГ показали очень высокую временную стабильность своих метрологических характеристик. Приводятся результаты исследования стабильности образцовых ячеек УЭП, которые позволили определить для них необходимый межкалибровочный интервал: проверка ячеек должна проводиться с помощью стандартной морской воды IAPSO SSW со сроком хранения не более двух лет и рассчитана на калибровку не более двух-трёх СТД-зондов.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, СТД-зонд, СПТС, ТТВ, ТПГ, образцовая ячейка измерения УЭП, установка для измерения УЭП морской воды, методика калибровки, статическая функция преобразования (СФП).

Во всём мире и в нашей стране постоянно растёт спрос на высококачественные, метрологически обеспеченные научные океанографические данные. Важное место среди них занимают данные измерений основных параметров морской воды: электропроводности, темпера-

туры и давления, осуществляемые с помощью СТД-зондов. Эти данные наряду с другими широко используются для изучения и промышленного освоения биопродуктивных зон и новых промысловых районов, в качестве источника измерительной информации при создании баз океанологических данных, методов долгосрочного и краткосрочного прогнозирования состояния среды и рыбных запасов, внося существенный вклад в реализацию глобальных и региональных программ. Наиболее важным компонентом повышения качества натуральных данных является принятие основных элементов метрологического обеспечения СТД-измерителей, согласованных на отечественном и международном уровне: эталонов, стандартов, методов, технологий и средств калибровки, составляющих техническую и методическую базу океанологических наблюдений.

Образцовые средства измерения, эталоны и стандарты, должны быть, в свою очередь, «увязаны» с национальными и международными стандартами.

Анализ положений Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» [ФЗ, 2008], метрологических правил [ПР 50.2.016–94; ПР 50.2.017–95; ПР РСК 005–03; Р ЗСК 001–95], требований Международной глобальной программы сбора океанологических данных (World Ocean Circulation Experiment, WOCE) к средствам измерения параметров водной среды, отечественного и зарубежного опыта использования средств и методов калибровки измерения параметров водной среды [Левашов, 2003] позволил сформулировать три основных принципа, которыми следует руководствоваться при выборе и использовании метрологического обеспечения:

1. прослеживаемость поверок, калибровок и измерений;
2. соответствие тактико-технических и метрологических характеристик средств калибровки принципу прослеживаемости поверок, калибровок и измерений;
3. репрезентативность используемых методов калибровок.

Все три главных принципа направлены на обеспечение качества проведения калибровочных работ.

Принцип прослеживаемости калибровок и измерений заключается в возможности установления связи исходных эталонов (образцовых средств и стандартов), средств калибровки и измерителей с первичными эталонами единиц международной системы измерений (СИ) посредством неразрывной цепи поверок, калибровок или сличений. Привязка к единицам СИ достигается через международные и национальные эталоны или стандарты.

Средство калибровки, имеющее наименьшую погрешность, передаёт единицу измерения средству калибровки, имеющему более низкий класс точности и так далее — до средства измерения. Метрологические характеристики каждого последующего средства калибровки в цепи передачи единицы измерений, считая от эталона до измерителя, должно иметь погрешность (неопределённость) как минимум в 2 раза большую, чем предыдущее средство калибровки. Тактико-технические и метрологические характеристики средств калибровки и измерений должны определять периодичность их поверок и калибровок, а также являться основой для разработки методик калибровки средств измерений.

Репрезентативность используемых методов предполагает унификацию и согласование на отечественном и международном уровне стандартов и методик калибровки средств измерения. Она обеспечивают повторяемость получаемых океанографических данных, регламентирует технологию проведения калибровки (поверки) всех средств калибровки и измерений, используемых при проведении калибровочных работ, включая средства для вспомогательных измерений (например, для контроля параметров окружающей среды), имеющих значительное влияние на точность и достоверность результатов калибровки. Средства для вспомогательных измерений должны быть поверены (калиброваны) перед вводом в эксплуатацию.

Состояние средств калибровки, обращение с калибруемыми средствами измерений, состояние помещения и окружающей среды, человеческий фактор также играют важную роль в обеспечении качества калибровочных работ, но выходят за рамки настоящего исследования.

В исследовательских подразделениях рыбохозяйственной отрасли РФ по состоянию

на 2014 г. в эксплуатации находились 24 измерителя повышенной точности, 4 измерителя среднего и минимального уровня точности и 8 многопараметрических зондов. Значительную часть средств измерений повышенной точности (18 зондов) составляет прецизионные измерители фирмы Sea Bird. В таблице 1 представлены основные метрологические характеристики этих измерителей.

Следует отметить, что по классификации средств измерения температуры [ГОСТ 8.558–93 ГСИ] и УЭП [ГОСТ 8.457–2000 ГСИ] подавляющее число СТД-зондов, применяемых для океанологических рыбохозяйственных исследований (табл. 1), относятся к образцовым средствам измерения и даже

к рабочим эталонам. В связи с этим выбор и использование средств калибровки СТД-зондов представляет исключительно важную и непростую задачу.

Особое место занимают прецизионные измерители температуры SBE35 и RBR solo TR-1060, которые по своим метрологическим характеристикам наряду с зондами SBE911, SBE25 и ICTD могут служить средствами калибровки датчиков температуры остальных приборов. Показания зондов повышенной точности, включая модели SBE19plus, SBE19plus V2 и Citadel CTD-NV фирмы TRDI, также можно использовать для калибровки чувствительных элементов электропроводности и давления СТД-зондов 2-го класса

Таблица 1. Основные метрологические характеристики СТД-зондов и измерителей, используемых в отраслевых институтах

Название средства измерения	Кол-во	Погрешность измерения		
		Электропроводность, мСм/см	Температура, °С	Давление, % от ПШ
<i>СТД-зонды повышенной точности</i>				
SBE35 «Sea-Bird»	1	–	±0,001	–
RBR solo TR-1060 «RBR»	1	–	±0,002	–
SBE911 «Sea-Bird»	1	±0,003	±0,001	±0,015
SBE25 «Sea-Bird»	2	±0,003	±0,002	±0,1
ICTD «FSI»	2	±0,003	±0,002	±0,025
SBE19plus «Sea-Bird»	7	±0,005	±0,005	±0,1
SBE19plus V2 «Sea-Bird»	7	±0,005	±0,005	±0,1
Citadel CTD-NV «TRDI»	3	±0,003	±0,005	±0,05
<i>СТД-зонды 2-го класса точности</i>				
ASTD102 «JFE Advantech»	2	±0,01	±0,01	±0,3
MDS-MkV «JFE Advantech»	1	–	±0,05	±1,0
ГРС-3 «Тайфун»	1	±0,05	±0,05	±(0,5 + 0,002×ИВ)
<i>Многопараметрические зонды</i>				
Hydrolab MS-5	1	±1% от ИВ±0,001 мСм/см	±0,1	±0,05
YSI CastAway-CTD	1	±0,25% ±5 мкСм/см	0,05	±0,25
YSI 6600 V2	1	±0,5% от ИВ	±0,15	±0,2
YSI EXO 2	1	±0,5% от ИВ	±0,15	±0,2
YSI PRO	1	±0,5% от ИВ	±0,15	±0,2
YSI 5200	1	±0,5% от ИВ	±0,15	±0,2
Horiba U-50	1	±0,1	±0,3 + 0,005×T	±0,01
Horiba U-52	1	±0,1	±0,3 + 0,005×T	±0,01

Примечание. ИВ — измеряемая величина; ПШ — полная шкала диапазона.

точности и многопараметрических измерителей (приборы фирм JFE Advantech, YSI, Horiba и Hydrolab).

Метрологическое обеспечение при калибровке датчиков температуры основано на Международной шкале температуры 1990 г. (МТШ-90), которая представляет собой ряд поддиапазонов, объединяющих физически воспроизводимые условия — реперные точки. Вся совокупность значений шкалы температуры определяется свойствами эталонного (идеального) стандартного платинового термометра сопротивления (СПТС). Эти свойства описываются набором стандартных функций: $\{W_r(T_{90})\}$.

Для океанского диапазона изменения температуры практическое значение имеют два поддиапазона, представленные — тремя первичными стандартами (реперными точками):

- тройной точкой ртути (ТТР): $-38,8344\text{ }^\circ\text{C}$;
- тройной точкой воды (ТТВ): $+0,0100\text{ }^\circ\text{C}$;
- точкой плавления галлия (ТПГ): $+29,7646\text{ }^\circ\text{C}$.

Стандартная функция эталонного СПТС в пределах поддиапазона ТТВ-ТПГ имеет вид:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i [T_{90} - 754,15] / 481]^i, \quad (1)$$

а в пределах поддиапазона ТТР-ТПГ:

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \{[\ln(T_{90} / 273,16\text{K}) + 1,5] / 1,5\}^i, \quad (2)$$

где C_0, C_i, A_0 и A_i — коэффициенты выражений (1) и (2) МТШ-90, представленные в таблице 2; T_{90} — температура в градусах К; $T_{90} = T + 273,15$; T — температура, $^\circ\text{C}$.

Реально используемые СПТС обладают свойствами, которые отличаются от свойств эталонного аналога. В связи с этим в процессе калибровки реального стандарта требуется определить его функцию отклонения $\Delta W(T_{90})$:

Таблица 2. Значения коэффициентов A_0, C_0 и A_i, C_i уравнений 1 и 2 МТШ-90 [Mangum, Furukawa, 1990].

A_i	Значение	C_i	Значение
A_0	-2,13534729	C_0	2,78157254
A_1	3,18324720	C_1	1,64650916
A_2	-1,80143597	C_2	-0,13714390
A_3	0,71727204	C_3	-0,00649767
A_4	0,50344027	C_4	-0,00234444
A_5	-0,61899395	C_5	0,00511868
A_6	-0,05332322	C_6	0,00187982
A_7	0,28021362	C_7	-0,00204472
A_8	0,10715224	C_8	-0,00046122
A_9	-0,29302865	C_9	0,00045724
A_{10}	0,04459872		
A_{11}	0,11868632		
A_{12}	-0,05248134		

$$\Delta W(T_{90}) = W(T_{90}) - W_r(T_{90}). \quad (3)$$

В пределах поддиапазона от $0\text{ }^\circ\text{C}$ (273,15 К) до $29,7646\text{ }^\circ\text{C}$ (302,9146 К) (ТТВР-ТПГ) используется следующее выражение для функции отклонения:

$$\Delta W(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1], \quad (4)$$

а в пределах поддиапазона от $-38,8344\text{ }^\circ\text{C}$ (234,3156 К) до $29,7646\text{ }^\circ\text{C}$ (302,9146 К) (ТТР-ТПГ):

$$\Delta W(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2. \quad (5)$$

Стандартная функция реального СПТС определяется в процессе измерения в каждой данной стабилизированной точке МТШ-90 как отношение его сопротивления в этой точке к его сопротивлению в ТТВ. В связи с чем неважно, по какой шкале при этом производится отсчёт температуры:

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16)} = \frac{R(T)}{R(0,01)}. \quad (6)$$

Случайная составляющая погрешности воспроизведения единицы температуры в диапазоне ТТР-ТТВ-ТПГ составляет от 0,00003 до 0,0012 $^\circ\text{C}$. При неисклѳенной составляющей систематической погрешности от 0,00004 до 0,0017 $^\circ\text{C}$ [Походун и др., 2009].

Калибровка СПТС осуществляется с помощью прецизионного моста сопротивлений (ПМС). СПТС помещается в ампулу стандарта реперной точки (ТТР, ТТВ или ТПГ) и удерживается до момента установления устойчивых показаний ПМС, который фиксирует величину N — отношение сопротивления СПТС, $R(T)$, к сопротивлению эталонной катушки сопротивлений (ЭКС), R_S , находящейся при комнатной температуре:

$$N = \frac{R(T)}{R_S}. \quad (7)$$

При этом погрешность и линейность ПМС и ЭКС должна составлять не более $\pm(1 \div 5) \times 10^{-6}$ Ом. В свою очередь, значение R_S зависит от температуры катушки, T , измеряемой встроенным электронным термометром в °С, и при отклонении T от 20 °С определяется по формуле:

$$R_S = R_{20} [1 + \alpha(T - 20) + \beta(T - 20)^2].$$

Таким образом, сопротивление СПТС $R(T)$ будет равно:

$$R(T) = NR_S = NR_{20} [1 + \alpha(T - 20) + \beta(T - 20)^2]. \quad (8)$$

Сопротивление ЭКС R_{20} и коэффициенты α и β определяются в процессе стандартной поверки 1 раз в пять лет во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Например, поверка ЭКС модели 5685А фирмы Tinsley, выполненная в июле 2014 г., показала: $R_{20} = 99,999961$ Ом, $\alpha = -0,013 \times 10^{-6}$ и $\beta = -0,061 \times 10^{-6}$.

Задачей калибровки СПТС в диапазоне ТТВ-ТПГ является определение коэффициента a уравнения (4).

Функция $W_r(T_{90})$ идеального СПТС в ТТВ и ТПГ соответственно равна: $W_r(\text{ТТВ}) = 1,00000000$ и $W_r(\text{ТПГ}) = 1,11813889$ [Mangum, Furukawa, 1990]. Следовательно, имеем отношение:

$$W(29,7646) - 1,11813889 = a[W(29,7646) - 1],$$

откуда:

$$a = \frac{[W(29,7646) - 1,11813889]}{[W(29,7646) - 1]},$$

или

$$a = \frac{\left[\frac{R(29,7646)}{R(0,01)} - 1,11813889 \right]}{\left[\frac{R(29,7646)}{R(0,01)} - 1 \right]},$$

где $R(29,7646)$ и $R(0,01)$ — сопротивления СПТС, измеренные в процессе калибровки в реперных точках — ТПГ и ТТВ соответственно.

Задачей калибровки СПТС в диапазоне ТТР-ТПГ является определение коэффициентов a и b уравнения (5).

Стандартная функция $W_r(T_{90})$ идеального СПТС в тройной точке ртути равна $W_r(\text{ТТР}) = 0,84414211$ [Mangum, Furukawa, 1990].

Коэффициенты a и b определяются из системы двух уравнений:

$$W(29,7646) - 1,11813889 = a[W(29,7646) - 1] + b[W(29,7646) - 1]^2;$$

$$\begin{aligned} W(-38,8344) - 0,84414211 = \\ = a[W(-38,8344) - 1] + \\ + b[W(-38,8344) - 1]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Например, для СПТС № 3181 модели 162 SE «Rosemount», поверенного во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в июле 2014 г. по стандартам реперных точек Государственного первичного эталона температуры ГЭТ 34–2007 в этом диапазоне были получены следующие значения его функции:

$$\begin{aligned} W(-38,8344^{\circ}\text{C}) &= \frac{R(-38,8344)}{R(0,01)} = \\ &= 0,8441935 \end{aligned}$$

и

$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{R(29,7646)}{R(0,01)} = 1,118103,$$

при значении сопротивления СПТС, $R(0,01) = 25,589339$ Ом, измеренного в ТТВ. Соответственно, из системы уравнений (9) были получены коэффициенты a и b функции отклонения СПТС № 3181:

$$a = -0,000151 \text{ и } b = -0,001297.$$

Необходимо отметить, что различие в показаниях этого СПТС, откалиброванного с использованием ТТР и без неё в диапазоне от 0 до -2 °С меняется практически линейно от 0,0000 до 0,0003 °С.

Метрологическая служба ФГБНУ «ВНИРО» располагает полным комплексом рабочих эталонов первого уровня метрологического обеспечения измерителей температуры: СПТС, ТТВ, ТПГ, ПМС и ЭКС (перечень приборов представлен далее при обсуждении калибровки датчиков электропроводности)

Ампулы реперных точек (ТТВ и ТПГ), а также СПТС регулярно поверяются во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева — головном государственном научном метрологическом институте Росстандарта РФ. В таблице 3 представлены результаты этих поверок, которые свидетельствуют о высокой временной стабильности и точности используемых средств калибровки.

В межповерочный период метрологической службой ФГБНУ «ВНИРО» ежеквартально проводится контроль состояния рабочих экземпляров СПТС — перед каждой серией калибровок СТД-зондов.

Следующим этапом передачи единицы СИ является передача единицы температуры от СПТС к измерительным датчикам СТД-зондов посредством их калибровки. Калибровка проводится по 7÷8 температурно-стабилизированным точкам в диапазоне от 30 до -2 °С. Для этого СТД-зонд помещается в терморегулируемый титановый бак ёмкостью 216 л модели 7051А фирмы Hart Scientific (США) [Рамазин и др., 2007], заполненный морской водой. Погрешность стабилизации в рабочей зоне калибровки должна быть не хуже $\pm(0,0002\div 0,0004)$ °С.

На рис. 1 в графическом виде зафиксирован стандартный момент стабилизации температуры и УЭП, измеренный с помощью платинового термометра сопротивлений (ПТС) и двух кондуктометрических ячеек стандарта электропроводности—температуры СТ-01, фирмы Idronaut (Италия), зафиксированный на экране дисплея. Масштаб измерения (одна клетка) соответствует 0,001 °С и 0,001 мСм/см (0,0001 См/м).

Калибровка осуществляется методом сличения показаний температурного датчика и СПТС. Целью и результатом калибровки является вычисление коэффициентов статической

Таблица 3. Временная стабильность метрологических характеристик ТТВ, ТПГ и СПТС, используемых ФГБНУ «ВНИРО»

Год проведения калибровки (поверки)	Тройная точка воды, 0,0100 °С	Точка плавления галлия, 29,7646 °С	Стандартный платиновый термометр сопротивления 25,5 Ом № 3221	Стандартный платиновый термометр сопротивления 25,5 Ом № 3181
Неопределённость (погрешность) измерения температуры, мК				
1989	СКО = 0,2	СКО = 0,3	СКО = 0,5	СКО = 0,5
2006	СКО = 0,2	СКО = 0,5	—	—
2009	РСН = 0,1	РСН = 0,2	—	—
2010	—	—	—	СКО = 0,5
2012	—	—	СКО _{ТТВ} = 0,06 СКО _{ТПГ} = 0,2 СКО _{ТТР} = 0,3	—
2013	РСН = 0,1	РСН = 0,2	—	—
2014	—	—	—	РСН _{ТТВ} = 0,5 РСН _{ТПГ} = 1,8 РСН _{ТТР} = 2,5

Примечание. СКО — среднеквадратичное отклонение, приблизительно равное стандартной неопределённости при доверительном интервале $\kappa = 1$; РСН — расширенная стандартная неопределённость при доверительном интервале $\kappa = 2$; ТТВ — тройная точка воды; ТПГ — точка плавления галлия; ТТР — тройная точка ртути.



Рис. 1. Окно программы ICAL стандарта электропроводность–температура СТ-01. Верхняя часть — показания платинового термометра сопротивления СТ-01. Значения УЭП второй ячейки сдвинуты относительно первой на 0,004 мСм/см

функции преобразования измерителя (СФП), которые заносятся в память, калибровочный, или конфигурационный, файл зонда.

Для 18 измерителей СТД-зондов фирмы Sea-Bird и 3 СТД-зондов Citadel CTD-NV фирмы TRDI (табл. 1) СФП имеет вид:

$$T_{90} = \frac{1}{\{A_0 + A_1[\ln(R)] + A_2[\ln^2(R)] + A_3[\ln^3(R)]\}} - 273,15, \quad (10)$$

где A_0, A_1, A_2 и A_3 — искомые калибровочные коэффициенты.

Для СТД-зондов SBE25, SBE911 и SBE35:

$$R = 1000,00/f,$$

где f — частота измерительного сигнала, Гц.

Для СТД-зондов SBE19plus и SBE19plus V2:

$$R = \frac{(MV2,9 \times 10^{12}) + (1,024 \times 10^8)}{(2,048 \times 10^4) + (MV2,0 \times 10^5)}, \quad (11)$$

$$MV = \frac{(n - 524288)}{1,6 \times 10^7}, \quad (12)$$

где $n = f$ — частота измерительного сигнала, Гц.

Для СТД-зондов Citadel STD-NV (или NXIC-STD FSI):

R — код, несущий информацию о сопротивлении термометриста.

Для зонда ICTD (FSI) и ГРС-3 (Тай-фун) СФП имеет вид:

$$T = A + BN + CN^2 + DN^3, \quad (13)$$

где N — код, несущий информацию о сопротивлении ПТС зонда; A, B, C и D — искомые калибровочные коэффициенты.

Вычисление искомых калибровочных коэффициентов A_0, A_1, A_2 и A_3 , а также коэффициентов A, B, C и D СФП проводится на основе данных, полученных в результате калибровки с использованием программ «МАТЛАБ» или POLYTEST.

Особое место занимает калибровка датчика температуры SBE35 (табл. 1), инструментальная погрешность измерения которого составляет $\pm 0,001$ °C и который в ряде случаев может заменить СПТС для лабораторной и морской калибровки [Hydrographic Measurement, 2010].

На первом этапе SBE35 калибруется аналогично менее точным SBE-зондам. В результате калибровки вычисляются коэффициенты СФП измерителя температуры. Затем чувствительный элемент измерителя (платиновый термометр сопротивлений) помещают последовательно сначала в ТТВ, а затем в ТПГ до момента установления устойчивых показаний прибора. Калибровочные коэффициенты *slope* и *offset* определяются путём решения системы двух уравнений с использованием программы «МАТЛАБ»:

$$T_{90}(\text{ТТВ})_{\text{SBE35}} = \text{slope} \times T_{90}(\text{ТТВ})_{\text{изм}} + \text{offset} = 0,0100, \quad (14)$$

$$T_{90}(\text{ТПГ})_{\text{SBE35}} = \text{slope} \times T_{90}(\text{ТПГ})_{\text{изм}} + \text{offset} = 29,7646. \quad (15)$$

Калибровочные коэффициенты статической функции преобразования, а также коэффициенты *slope* и *offset* заносятся в конфигурационный файл измерителя.

Часто политикой фирм-изготовителей СТД-зондов, например, таких как ASTD102 и MDS-MkV (фирма JFE Advantech), явля-

ется сокрытие СФП датчиков. Это делается для того, чтобы привязать к себе пользователя аппаратуры. В этом случае задачей калибровки является определение корректирующего уравнения СФП.

Корректирующее уравнение определяется методом сличения показаний температурного датчика, СПТС или иного образцового средства измерения температуры соответствующего класса точности. В качестве корректирующего уравнения обычно используется уравнение первого или второго порядка.

Температурный датчик многопараметрических измерителей, как правило, калибруется на заводе-изготовителе и не подлежит последующей перекалибровке. Вместе с тем, несмотря на заверения изготовителя, гарантирующего нахождение точностных характеристик датчика внутри заявленного диапазона инструментальной погрешности, часто существует необходимость введения корректировки. И хотя введение корректировки в память прибора технически невозможно, необходимо определение корректирующего уравнения и последующее его использование при обработке результатов измерений.

Выбор метрологического обеспечения и его использование при калибровке датчиков электрической проводимости морской воды (УЭП) основан на определении Практической шкалы солёности 1978 г. (ПШС-78), в котором практическая солёность определяется через отношение K_{15} удельной электропроводности (УЭП) пробы морской воды, находящейся при нулевом избыточном давлении и температуре 15 °C, и УЭП раствора хлористого калия массой раствора в 1 кг, содержащего 32,4356 г KCl при тех же показателях давления и температуры [Архипкин и др., 2009].

Относительная электропроводность K_{15} определяет практическую солёность пробы в соответствии с зависимостью:

$$S = a_0 + a_1 K_{15}^{1/2} + a_2 K_{15} + a_3 K_{15}^{3/2} + a_4 K_{15}^2 + a_5 K_{15}^{5/2}, \quad (18)$$

для $2 \leq S \leq 42$.

Для проведения расчётов практической солёности и калибровки СТД-зондов используется величина относительной электро-

проводности R_T , равная отношению УЭП исследуемой пробы морской воды $C(S, T, 0)$ солёностью S , измеряемой при температуре T и нулевом избыточном давлении к УЭП пробы стандартной морской воды $C(35, T, 0)$ солёностью 35, при той же температуре T и давлении:

$$R_T = \frac{C(S, T, 0)}{C(35, T, 0)}. \quad (19)$$

Значение величины R_T и солёности стандартной морской воды S указываются на этикетке ампулы.

Обычно величину R_T измеряют непосредственно с помощью лабораторных солемеров. В связи с этим влияние относительно небольших различий между R_T и R_{15} при данной солёности учтено посредством добавления величины коррекции ΔS к величине практической солёности, вычисленной путём подстановки R_T в уравнение (18) вместо K_{15} . Таким образом, практическую солёность можно вычислить с помощью уравнения:

$$S = a_0 + a_1 R_T^{1/2} + a_2 R_T + a_3 R_T^{3/2} + a_4 R_T^2 + a_5 R_T^{5/2} + \Delta S; \quad (20)$$

$$\Delta S = (T - 15) (b_0 + b_1 R_T^{1/2} + b_2 R_T +$$

$$+ b_3 R_T^{3/2} + b_4 R_T^2 + b_5 R_T^{5/2}) / [1 + k(T - 15)], \quad (21)$$

где T — температура, °C по Международной практической шкале температуры 1968 г. (МПШТ-68); коэффициенты a_i, b_i, k уравнений (20, 21) представлены в таблице 4.

Для вычисления образцового значения УЭП исследуемой пробы воды при калибровке с помощью солемера преобразуем отношение (19) к виду:

$$C(S, T, 0) = R_T C(35, T, 0), \quad (22)$$

где $C(35, T, 0)$ — зависимость УЭП пробы стандартной морской воды солёностью 35 при нулевом давлении от температуры МПШТ-68:

$$C(35, T, 0) = C(35, 15, 0) \times (c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4), \quad (23)$$

где T — значение температуры в момент измерения УЭП зондом и параллельного отбора проб воды для последующего измерения R_T на солемере; $c_0 \dots c_4$ — коэффициенты, представленные в таблице 4.

Уравнения (20–23) являются основными уравнениями для расчета образцовых значений

Таблица 4. Значения эмпирических коэффициентов a_i, b_i, c_i, d_i, e_i и k в формулах (20, 21, 23) для океанской и каспийской воды [Рамазин, 2009]

Значения индекса i коэффициентов a_i, b_i, c_i, d_i, e_i						
i	0	1	2	3	4	5
<i>Океанская вода</i>						
a_i	0,0080	-0,1692	25,3851	14,0941	-7,0261	2,7081
b_i	0,0005	-0,0056	-0,0066	-0,0375	-0,0636	-0,0144
c_i	0,6766097	$2,00564 \times 10^{-2}$	$1,104259 \times 10^{-4}$	$-6,9698 \times 10^{-7}$	$1,0031 \times 10^{-9}$	
d_i		$3,426 \times 10^{-2}$	$4,464 \times 10^{-4}$	$4,215 \times 10^{-1}$	$-3,107 \times 10^{-3}$	
e_i		$2,070 \times 10^{-5}$	$-6,370 \times 10^{-10}$	$3,989 \times 10^{-15}$		
k	0,0162					
<i>Каспийская вода</i>						
a_i	-0,0032	0	30,1	0	24,685	-15,1808
b_i	-0,0030	0	0,0044	0	-0,044	0
c_i	0,6766097	$2,00564 \times 10^{-2}$	$1,104259 \times 10^{-4}$	$-6,9698 \times 10^{-7}$	$1,0031 \times 10^{-9}$	
d_i		$3,43 \times 10^{-2}$	$4,457 \times 10^{-4}$	$4,205 \times 10^{-1}$	$-3,125 \times 10^{-3}$	
e_i		$4,740 \times 10^{-6}$	$-2,153 \times 10^{-10}$	$1,015 \times 10^{-11}$		
k	0,0162					

УЭП при лабораторной калибровке датчиков УЭП СТД-зондов. Следует отметить, что среднеквадратичные отклонения (СКО) аппроксимации экспериментальных данных этих уравнений в эквивалентах солёности составляют 0,0007 [Perkin, Levis, 1980].

Величина отношения УЭП пробы стандартной морской воды $C(35, 15, 0)$, имеющей солёность 35, находящейся при нулевом избыточном давлении и температуре 15 °С, к УЭП раствора хлористого калия, содержащего 32,4356 г KCl при тех же показателях давления и температуры, равна:

$$K_{15} = \frac{C(35, 15, 0)}{C(KCl, 15, 0)} = 1,00000,$$

являясь самой надёжной точкой ПШС-78 — точкой, в которой происходит совпадение значений солёности всех предыдущих её определений от Кнудсена до Кокса [Ерофеев и др., 1975].

Стандартная морская вода при этом является вторичным эталоном (после раствора KCl) и основным стандартом для измерения электропроводности морской воды.

В настоящее время в качестве основного стандарта морской воды используется IAPSO Standard Seawater (IAPSO SSW) серии 35P солёностью 35, выпускаемая фирмой OSIL (Великобритания) под наблюдением Международной ассоциации физических наук об океане (IAPSO).

Для охвата всего диапазона изменения солёности (2÷42) и устранения небольшой нелинейности солемера используются стандарты более высоких и более низких значений солёности (IAPSO SSW) — серий 38H, 30L, 10L — 38, 30 и 10 единиц практической солёности соответственно.

Необходимым условием использования ампул IAPSO SSW для получения погрешности калибровки по солёности $\leq 0,001$ является его периодическое обновление (приобретение), не реже 1 раза в 2 года [Culkin, Ridout, 1998; Bacon et al., 1998]. При этом важно напомнить, что среднеквадратичные отклонения (СКО) аппроксимации экспериментальных данных выражениями для стандартной морской воды r_T — уравнение (27), в эквивалентах

солёности составляют 0,0003 [Perkin, Levis, 1980].

Необходимо отметить, что разлив нормальной воды — российского аналога IAPSO SSW, выпускавшегося ранее Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН, в настоящее время прекращён. Оставшиеся ампулы 2003 г. и более раннего срока производства не отвечают новым возросшим метрологическим требованиям ПШС-78.

ПШС-78 содержит алгоритм расчёта практической солёности по данным СТД-измерений, который справедлив для диапазона изменения солёности от 2 до 42, температуры от –2 до 35 °С МПТШ-68 и избыточного давления до 10000 дбар. Этот алгоритм используется для морской калибровки СТД-зондов.

Измерения, проводимые прямо в море, обычно дают величину:

$$R = \frac{C(S, T, \rho)}{C(35, 15, 0)}, \quad (24)$$

равную отношению УЭП, измеренную *in situ*, к УЭП стандартной морской воды $S = 35$, при $T = 15$ °С МПТШ-68 и $\rho = 0$, значение которой равно 42,914 мСм/см.

R представляет собой произведение трёх сомножителей, а именно:

$$\begin{aligned} R &= \frac{C(S, T, \rho)}{C(35, 15, 0)} = \\ &= \frac{C(S, T, \rho)}{C(S, T, 0)} \times \frac{C(S, T, 0)}{C(35, T, 0)} \times \\ &\times \frac{C(35, T, 0)}{C(35, 15, 0)} = R_\rho R_T r_T, \end{aligned} \quad (25)$$

$R_\rho = \frac{C(S, T, \rho)}{C(S, T, 0)}$ — есть отношение удель-

ной электропроводности, измеренной *in situ*, к удельной электропроводности той же пробы при той же самой температуре при избыточном давлении $\rho = 0$; r_T — есть отношение УЭП стандартной морской воды, имеющей практическую солёность 35 при температуре T и давлении $\rho = 0$, к её удельной электропроводности при $T = 15$ °С и $\rho = 0$, определяемая из уравнения (23) по формуле:

$$r_T = (c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4). \quad (26)$$

R_ρ находится по эмпирической формуле:

$$R_\rho = \frac{1 + [\rho(e_1 + e_2 \rho + e_3 \rho^2)]}{[1 + d_1 T + d_2 T^2 + (d_3 + d_4 T)R]}, \quad (27)$$

где e_i, d_i — коэффициенты, представленные в таблице 4.

При морской калибровке измеряемое значение УЭП СТД-зонда $C(S, T, \rho)_{изм}$ должно сравниваться с образцовым значением УЭП, определённого из уравнения (25). При этом R_T — это измеренное на образцовом солемере значение относительной электропроводности пробы воды, отобранной с глубины, соответствующей давлению ρ и температуре T калибруемого СТД-зонда.

Знания R, R_ρ и r_T позволяют вычислить R_T на основе результатов, полученных при измерениях в море, т.е.:

$$R_T = \frac{R}{R_\rho r_T}. \quad (28)$$

В силу того, что у СТД-зондов калибруемый и выходной измеряемый параметр — не относительная электропроводность R , а УЭП этой же пробы воды — $C(S, T, \rho)$, определяемая как частное от деления величины R на величину $C(35, 15, 0) = 42,914$ мСм/см — значение стандартной морской воды IAPSO SSW при $S35, T=15$ °C и $\rho=0$. В связи с этим для практического использования формулу (28) целесообразно преобразовать к виду:

$$R_T = \frac{C(S, T, \rho)}{42,914 R_\rho r_T}. \quad (29)$$

Тогда образцовое значение $C(S, T, \rho)$ определится по формуле:

$$C(S, T, \rho) = 42,914 R_T r_T R_\rho, \quad (30)$$

где r_T и R_ρ — значения, определяемые по формулам (26, 27) при значениях температуры и давления, соответствующих моменту измерения СТД-зондом и параллельного батометрического отбора проб морской воды. В формуле (27) $R=C(S, T, \rho)_{изм}/42,914$.

Следует отметить, что СКО аппроксимации экспериментальных данных выражениями для R_ρ (28) в эквивалентах солёности составляют 0,0013 [Perkin, Levis, 1980]. А общее стандартное отклонение оценивается величиной 0,0015 единиц практической солёности и зависит главным образом от слагаемого, подверженного влиянию давления — R_ρ в уравнении (27).

Лабораторная калибровка осуществляется методом сличения показаний датчика УЭП и образцового измерителя относительной или удельной электропроводности морской воды. В качестве образцового измерителя относительной электропроводности может служить солемер модели Autosal 8400B «Guildline» (Канада), рекомендованный глобальной международной программой World Ocean Circulation Experiment (WOCE). В качестве образцового измерителя УЭП может служить, например, стандарт электропроводность—температура СТ-01 фирмы Idronaut (Италия).

Независимо от выбора образцового измерителя УЭП общим для них является необходимость наличия целого комплекса средств калибровки.

Метрологическая служба ФГБНУ «ВНИРО» располагает следующими рабочими эталонами первого уровня метрологического обеспечения:

1. Измерителей температуры:
 - тройная точка воды (ТТВ) 0,0100 °C (Jarrett Instrument, США);
 - точка плавления галлия (ТПГ) 29,7646 °C фирмы (Yellow Springs Instrument);
 - стандартные платиновые термометры сопротивления модели 162 CE (Rosemount, США);
 - стандартный АС/DC эталон-резистор (ЭКС) сопротивлением 100 Ом модели 5685A (Tinsley, Великобритания), имеющий погрешность, не превышающую $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ Ом;
 - прецизионный мост сопротивлений (ПМС) модели F18 (Automatic Systems Laboratories Ltd., Великобритания).
2. Измерителей УЭП:
 - солемер модели Autosal 8400B (Guildline, Канада);
 - стандарт электропроводность—температура модели СТ-01 (Idronaut, Италия).

— стандартная морская вода IAPSO SSW серий 35P, 30L, 10L, 38H (OSIL, Великобритания).

3. Оборудование для стабилизации температуры и УЭП морской воды на уровне не хуже 0,0005 °С и 0,0005 мСм/см:

— терморегулируемый бак для стабилизации температуры и электропроводности морской воды (Hart Scientific, США) модели 7051A ёмкостью 216 л (−2÷35 °С).

Всё это оборудование сконструировано в виде «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО, зав. № 01» — проблемно-ориентированного комплекса метрологических средств калибровки, позволяющих осуществлять передачу единицы измерений как от первичных государственных, так и от международных эталонов к средствам измерения температуры и УЭП морской воды.

Выбор образцового средства измерения УЭП зависит от того, существует ли возможность регулярно заполнять термобак североатлантической океанской водой, солевой состав которой практически не отличается от солевого состава стандартной морской воды IAPSO SSW.

Если такая возможность существует, то правомерен выбор солемера модели Autosal 8400В или аналогичного. В противном случае рекомендуем выбрать стандарт электропроводность—температура СТ-01 или образцовое средство аналогичного класса точности, например CSA-1250 фирмы Neil Brown Instrument System (США).

Для его использования кондуктометрические ячейки после многократной промывки, аналогично ячейкам солемера, заполняются стандартной морской водой IAPSO SSW. Затем ячейки погружаются в термобак, где выдерживаются при 3–5 стабилизированных значениях температуры в диапазоне (30–0) °С до полного выравнивания значений температуры внутри ячеек и термобаке.

СФП ячеек соответствует линейному уравнению:

$$C(35, T, 0) = a + bN, \quad (31)$$

где a и b — калибровочные коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов по результатам обработки серий измерений: N — кодовых (не преобразованных) значений УЭП ячейки и образцовых значений $C(35, T, 0)$, определяемых по уравнению (26).

Большое значение как метрологическая характеристика образцовых ячеек имеет её временная стабильность — стабильность СФП. На рис. 2 представлены графики исследования временной изменчивости СФП образцовой ячейки СТ-01, проводимой с периодичностью 1–2 недели с 25 января 2012 г. по 28 марта 2012 г. Как видно из результатов проведённого исследования, уход СФП за 2 месяца находится в пределах $\pm(0,002–0,003)$ мСм/см. Вместе с тем уход СФП от калибровки к калибровке в основном не превышает (0,001–0,002) мСм/см.

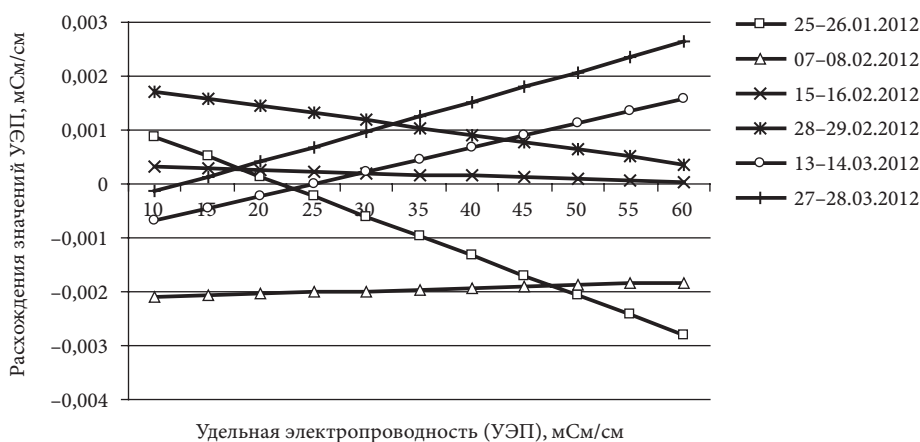


Рис. 2. Стабильность статической функции преобразования образцовой ячейки в процессе её калибровки по стандартной морской воде (IAPSO SSW серии P153, $S = 34,992$) в январе—марте 2012 г.

Таким образом, для достижения качества следует проводить калибровку образцовых ячеек перед каждой серией калибровок датчиков УЭП STD-зондов повышенной точности.

Целью и результатом калибровки датчиков УЭП является вычисление коэффициентов СФП измерителя УЭП, которые заносятся в память, калибровочный, или конфигурационный, файл зонда.

Для STD-зондов фирмы Sea-Bird (табл. 1) СФП имеет вид:

$$C(S, T, 0) = slope \frac{[g + hf^2 + if^3 + jf^4]}{[1 + \delta T + \varepsilon \rho]} + (32) \\ + offset,$$

где f — частота измеренного сигнала, Гц; T — температура, °С, МПТШ-68; ρ — давление, дбар, в момент измерения STD-зонда и параллельного отбора проб морской воды (или одновременного измерения с помощью образцовой ячейки); g, h, i, j — искомые калибровочные коэффициенты при $\rho = 0$; $\delta = 3,25 \times 10^{-6}$, $\varepsilon = -9,5700 \times 10^{-8}$.

Вычисление искомых калибровочных коэффициентов g, h, i, j , а также коэффициентов A, B, C, D и E СФП проводится на основе данных, полученных в результате калибровки с использованием специализированной программы, написанной в Excel 2003.

Для STD-зондов Citadel STD-NV «TRDI», ICTD «FSI» и ГРС-3 «Тайфун» статическая функция преобразования имеет вид:

$$C(S, T, 0) = A + BN + (33) \\ + CN^2 + DN^3 + EN^4,$$

где N — код (необработанные данные), несущий информацию об УЭП датчика зонда; A, B, C, D и E — искомые калибровочные коэффициенты.

Вычисление искомых калибровочных коэффициентов A, B, C, D и E СФП (32, 33) проводится на основе данных, полученных в результате калибровки с использованием программы «МАТЛАБ» или POLYTEST, либо специализированной программы, написанной в Excel 2003.

Калибровка датчиков электропроводности многопараметрических зондов не представляет какой-нибудь большой сложности и дана в инструкции по эксплуатации к этим приборам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетней работы метрологической службой ФГБНУ «ВНИРО» были отобраны средства метрологического обеспечения и определены научно-методические методы его использования, базирующиеся на принципах построения МТШ-90 и ПШС-78, которые легли в основу создания «Установки для измерения удельной электропроводности морской воды ВНИРО» — проблемно-ориентированного комплекса метрологических средств калибровки, позволяющих осуществлять передачу единицы измерений как от первичных государственных, так и от международных эталонов к средствам измерения основных параметров морской воды. На Установку для измерения УЭП морской воды ВНИРО Росстандартом РФ выдано Свидетельство об утверждении типа средства измерений (RU.E.31.001.A № 42535). А ФГБНУ «ВНИРО» выдан аттестат аккредитации на право проведения калибровочных работ (реестр № 004055 от 10.12.2010 г.).

Это позволило только с 2011 по 2015 гг. откалибровать 74 STD-зонда повышенной точности моделей: SBE911, SBE25, SBE19plus, SBE19plus V2, SBE16plus, SBE16plus V2, SBE37 фирмы Sea Bird Electronics, Inc., модели MicroCTD, 2ACM-OP-CTD, EXCELL2 Low Power, NXIC CTD фирмы Falmouth Scientific, Inc. и CITADEL-NV-CTD фирмы Teledyne RD Instruments (США), SD-204 фирмы SAIV A/S (Норвегия), а также различные измерители и анализаторы качества воды фирм Hydrolab и YSI (США), датчики и макеты отечественных измерителей. Большинство этих приборов было задействовано в различных океанологических, в том числе рыбохозяйственных, международных исследовательских программах.

Проведённые многолетние наблюдения временной стабильности эталонных средств калибровки измерителей температуры СПТС, ТТВ и ТПИГ показали очень высокую стабильность их метрологических характери-

стик. Исследования временной стабильности образцовых ячеек измерения УЭП позволили определить для них необходимый межкалибровочный интервал: калибровка ячеек должна проводиться с помощью стандартной морской воды IAPSO SSW со сроком хранения не более двух лет, они рассчитаны на калибровку не более двух-трёх STD-зондов.

Таким образом, впервые в нашей стране создана реальная легитимная метрологическая основа для функционирования баз океанологических данных как части общемировой системы сбора и хранения океанологических данных, решения оперативных задач краткосрочного прогнозирования, поиска и разведки рыбы, участия подразделений рыбохозяйственной отрасли РФ в обеспечении реализации глобальных международных программ по исследованию Мирового океана, разработки практических моделей для долгосрочного прогнозирования климатических изменений и запасов биологических водных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипкин В. С., Лазарюк А. Ю., Левашов Д. Е., Рамазин А. Н. 2009. Океанология: инструментальные методы измерения основных параметров морской воды. М.: МАКС Пресс. 336 с.
- ГОСТ 8.558–93 ГСИ. 1994. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Стандарт. 16 с.
- ГОСТ 8.457–2000 ГСИ. 2000. Государственная поверочная схема для средств измерений удельной электрической проводимости жидкостей / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Стандарт. 6 с.
- Ерофеев П. Н., Пономарева Л. С., Рамазин А. Н. 1975. Критерии определения солёности морской воды по электропроводности с учетом поправок на температуру и давление. Обзорная информация // Промысловая океанология. Сер. 9. Вып. 4. М.: ЦНИИТЭИРХ. 61 с.
- Левашов Д. Е. 2003. Техника экспедиционных исследований: инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО. 400 с.
- Походун А. И., Компан Т. А., Соколов Н. А., Герасимов С. Ф., Матвеев М. С., Никоненко В. А., Корнев А. С., Чурилина Н. В. 2009. Модернизированные государственные первичные эталоны

единиц теплофизических величин // Измерительная техника. № 8. С. 55–59.

- ПР 50.2.017–95. 1995. Положение о Российской системе калибровки. М.: Госстандарт России. 10 с.
- ПР 50.2.016–94. 1994. Требования к выполнению калибровочных работ. М.: Госстандарт России, ВНИИМС. 6 с.
- ПР РСК 005–03. 2003. Указания по применению ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2000 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» в Российской системе калибровки. М.: ВНИИМС. 20 с.
- Рамазин А. Н., Буланов В. В., Левашов Д. Е., Тишкова Т. В. 2005. Калибровка STD-зондов — метрологическое обеспечение измерений основных параметров среды обитания промысловых объектов // Материалы XIII Международной конференции по промысловой океанологии. Калининград: Изд-во АтлантНИРО. С. 235–238.
- Рамазин А. Н. 2009. Определение солёности Каспийского моря с помощью STD-зондов // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 6. № 2. С. 196–211.
- Р РСК 001–95. 1995. Типовое положение о калибровочной лаборатории. М.: ВНИИМС. 3 с.
- ФЗ № 102-ФЗ от 26.06.2008 (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений» / Принят Гос. Думой 11 июня 2008 г.
- Culkin B. F., Ridout P. S. 1998. Ocean Scientific International Ltd. Stability of IAPSO Standard Seawater // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. V. 15. P. 1072–1075.
- Hydrographic Measurement Techniques and Calibration. 2010. http://cdiac.ornl.gov/ftp/oceans/CLIVAR/P09_2010/P09_49RY20100706do.pdf (28.10.2014)
- Mangum B. W., Furukawa G. T. 1990. Guidelines for realizing the international temperature of 1990 (ITS-90) // NIST Tech. Note 1265. 190 p.
- Bacon S., Snaith H. M., Yelland M. J. 1999. An evaluation of some recent batches of IAPSO Standard Seawater // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. James Rennell Division, Southampton Oceanography Centre, Southampton, United Kingdom. P. 854–861.
- Perkin R. G., Levis E. L. 1980. The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the date. IEEE // J. Of Oceanic Engineering. OE5. 1. P. 107–114.

REFERENCES

- Arkhipkin V. S., Lazaryuk A. Yu., Levashov D. E., Ramazin A. N. 2009. Okeanologiya: Instrumental'nye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoy vody

- [Instrumental methods of measurement of the basic parameters of sea water]. М.: МАКС Press. 336 с.
- GOST 8.558–93 GSI. 1994. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmerenij temperatury [State verification schedule for means measuring temperature] / Mezhgosudarstvennyj sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. М.: Standart. 16 с.
- GOST 8.457–2000 GSI. 2000. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmerenij udel'noj elektricheskoy provodimosti zhidkostej [State verification schedule for means of measuring specific conductivity of liquids] / Mezhgosudarstvennyj sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. М.: Standart. 6 с.
- Erofeev P. N., Ponomareva L. S., Ramazin A. N. 1975. Kriterii opredeleniya solenosti morskoy vody po elektroprovodnosti s uchetom popravok na temperaturu i davlenie. Obzornaya informatsiya [Criteria for the definition of water salinity by electroconductivity with corrections for temperature and pressure] // Promyslovaya okeanologiya. Ser. 9. Vyp. 4. М.: CNIITEIRKH. 61 с.
- Levashov D. E. 2003. Tekhnika ekspeditsionnyh issledovaniy: Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva otsenki promyslovo-znachimyyh faktorov sredy [Facilities and technique for marine surveys: Instrumental methods and components for estimating the fishing-significant characteristics of sea water medium]. М.: Izd-vo VNIRO. 400 с.
- Pohodun A. I., Kompan T. A., Sokolov N. A., Gerasimov S. F., Matveev M. S., Nikonenko V. A., Korenev A. S., Churilina N. V. 2009. Modernizirovannye gosudarstvennye pervichnye etalony edinits teplofizicheskikh velichin [The modernized state primary standards of units of thermophysical magnitudes] // Izmeritel'naya tekhnika. № 8. S. 55–59.
- PR50.2.017–95. 1995. Polozhenie o Rossijskoj sisteme kalibrovki [The proposition of the Russian calibration system]. М.: Gosstandart Rossii. 10 с.
- PR50.2.016–94. 1994. Trebovaniya k vypolneniyu kalibrovочnyh rabot [Requirements for Calibration Procedures]. М.: Gosstandart Rossii. VNIIMS. 6 с.
- PR RSK 005–03. 2003. Ukazaniya po primeneniyu GOST R ISO/MEHK 17025–2000 “Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovочnyh laboratorij” v Rossijskoj sisteme kalibrovki [Guidelines on the application of ISO / IEC17025–2000 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” in the Russian calibration system]. М.: VNIIMS. 20 с.
- Ramazin A. N., Bulanov V. V., Levashov D. E., Tishkova T. V. 2005. Kalibrovka STD-zondov — metrologicheskoe obespechenie izmerenij osnovnyh parametrov sredy obitaniya promyslovyh ob'ektov [Calibration of oceanographic CTD-instruments is metrological maintenance of primary parameters measurements of living environment of fishing objects] // Materialy XIII Mezhdunarodnoj konferentsii po promyslovoj okeanologii. Kaliningrad: Izd-vo AtlantNIRO. S. 235–238.
- Ramazin A. N. 2009. Opredelenie solenosti Kaspiskogo morya s pomoshch'yu STD-zondov [Determination of the Caspian Sea salinity using CTD-probes] // Voprosy promyslovoj okeanologii. Vyp. 6. № 2. S. 196–211.
- R PSK 001–95. 1995. Tipovoe polozhenie o kalibrovочnoy laboratorii [Standard regulations on calibration laboratory]. М.: VNIIMS. 3 с.
- FZ ot 26.06.2008 № 102-FZ (red. ot 13.07.2015) “Ob obespechenii edinstva izmerenij” [On ensuring the uniformity of measurements] / Prinyat Gos. Dumoj 11 iyunya 2008 g.

Поступила в редакцию 24.11.15 г.
Принята после рецензии 24.02.16 г.

Some scientific and methodological aspects of metrological supply of conductivity and sea water temperature measurements with CTD-probes

A. N. Ramazin

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO", Moscow)

In practice of oceanological researches the demand for metrologically scientific sea water provided by location data grows very fast. Data of automated measuring of basic sea water parameters such as conductivity, temperature and pressure (CTD-probes) among them take a significant place. Means of metrological supply are chosen and scientific methods of its using, based on principles of formation of The International Temperature Scale (ITS-90) and The Practical Salinity Scale (PSS-78), are determined. These principles formed the basis of creation of "The Apparatus for measuring of sea water conductivity" (VNIRO) — the complex of metrological calibration means, which allows transferring units of measures from primary state and international standards to measuring tools. "The Certificate on approval of measuring means type" is issued to above mentioned "Apparatus...". It allowed calibrating of 74 CTD-probes of enhanced accuracy of "Sea-Bird Electronics, Inc.", "Falmouth Scientific, Inc.", "Teledyne RD Instruments" (USA) and "SAIV A/S" (Norway) companies since 2011 to 2015. Metrological characteristics of CTD-current meters used for fishing industry and means of its metrological supply are reviewed. The results of estimation of metrological characteristics of fishing industry CTD-probes are given. The description of basic scientific and methodical calibration principles of calibration of Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT), standard cells of conductivity measuring, sensors of temperature and conductivity of main CTD-probes, which are applied in practice of oceanological fisheries research, is given. The data of research of SPRT temporary stability, triple point of water (TPW) and the melting point of gallium (MPG) are presented. It is concluded that SPRT, TPW and MPG have shown very high temporary stability of its metrological characteristics. The results of investigation of temporary stability of standard measuring conductivity cells allowed to determine the necessary inter-calibration interval for these cells: cells calibration must be conducted with standard sea water IAPSO SSW having storage life no more than 2 years after calibration of no more than 2–3 probes.

Key words: metrological supply, CTD-probe, standard conductivity cell, apparatus for measuring of sea water conductivity, methods of calibration, static conversion function, standard platinum resistance thermometer (SPRT), triple point water (TPW), melting point of gallium (MPG).