

**РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ
СЛИЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ
ИЗМЕРЕНИЙ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ
ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ПРОЕКТАМ
ССQM-K105 И ССQM-P142**

*М.С. Рожнов, В.Г. Гаврилкин,
Л.В. Прокопенко, А.Ю. Стенник*

ГП «Укрметртестстандарт»,
г. Киев, ул. Метрологическая, 4
E-mail: solution@ukrcsm.kiev.ua

В статье приводятся результаты международных сличений в области измерений электролитической проводимости морской воды, проведенных в рамках проектов ССQM-K105 и ССQM-P142 Консультативного Комитета по химической метрологии (ССQM) Международного бюро мер и весов (МБМВ) с целью обеспечения прослеживаемости результатов измерений к системе единиц СИ.

Введение. Известно, что соленость морской воды является одной из важнейших характеристик для океанографических моделей, данные об измерении которой должны быть точными и стабильными во времени. До сих пор, практическая соленость – это относительная величина, вычисляемая в соответствии со Шкалой Практической Солености PSS-78 [1] по относительной электролитической проводимости (удельной электропроводности – УЭП) в сравнении с проводимостью стандартного образца (эталоны) морской воды (SSW) IAPSO при температуре 15°C. Эталон представляет собой специально обработанную природную морскую воду, относительная УЭП которой измеряется (нормируется) по сравнению с проводимостью эталонного раствора хлорида калия с массовой долей 32,4356 г/кг при той же температуре 15°C. В итоге, характеристики эталона морской воды, используемого для градуировки (калибровки) вторичных или рабочих приборов, нормируются в относительных единицах, а не в единицах СИ. Актуальной проблемой, в которой заинтересованы прежде всего

океанографические исследователи, является обеспечение прослеживаемости результатов определения практической солености морской воды к единицам и эталонам СИ. Предварительные исследования были проведены в рамках международных сличений ССQM-P111 [2] с участием национальных метрологических институтов (НМИ) ряда стран в сотрудничестве с научным комитетом по океанографическим исследованиям (SCOR) и Международной ассоциацией физических наук об океане (IAPSO). Всего в сличениях приняли участие 24 организации, в том числе национальные метрологические и океанографические институты.

Привязка результатов измерений практической солености к УЭП раствора хлорида калия, как первичного эталона, ставит сопоставимость океанографических баз данных в определенный риск. Во-первых, трудно подтвердить воспроизводимость УЭП раствора хлорида калия в течение длительного времени, как необходимое условие для обеспечения относительной неопределенности порядка 10^{-5} , которая соответствует потребностям океанографии. Невозможно правильно оценить характеристики растворов в течение, например, десяти лет или более, поскольку отклонения проводимости неизбежны при приготовлении растворов (т.к. меняются партии исходного реактива), а УЭП растворов может изменяться в зависимости от условий хранения. Во-вторых, результаты измерений практической солености используются в построении океанографических и климатических моделей совместно с другими величинами, которые измеряются в единицах СИ. Таким образом, несколько разных по прослеживаемости к эталонам СИ схем используются параллельно, что может привести к противоречивым результатам. Измерения практической солености в единицах СИ могли бы устранить эти недостатки.

Ключевые сличения ССQM-K105. Целью ключевых сличений ССQM-K105 [3] была демонстрация измерительных возможностей НМИ-

участников в области измерений проводимости многокомпонентных водных солевых растворов. С этой целью, участникам предлагалось провести измерения УЭП стандартного образца морской воды, поставленного РТВ (Германия), по методике, обеспечивающей прослеживаемость к СИ.

В сличениях приняли участие пятнадцать НМИ, в том числе: БелГИМ (Беларусь), CENAM (Мексика), DFM (Дания), GUM (Польша), INMETRO (Бразилия), INPL (Израиль), INRiM (Италия) – координатор сличений, МКЕН (Венгрия), NMIJ (Япония), РТВ (Германия) – поддерживающая лаборатория, SMU (Словакия), SP (Швеция), Укрметртестстандарт – UkrCSM (Украина), ВНИИФТРИ, ВНИИМ (Россия).

Раствор, используемый в этих сличениях, являлся стандартным образцом морской воды OSIL (Ocean Scientific International Ltd.), который представлял собой природную морскую воду, взятую с поверхности северной части Атлантического океана и разбавленную дистиллированной водой до значения 35 по PSS-78, которое соответствует приблизительно 5,3 См/м при 25°C и 4,3 См/м при 15°C. Рассылку образцов производил РТВ. При этом, проводилась принятая для подобных сличений оценка гомогенности и стабильности растворов в течение времени, отведенного для проведения измерений участниками сличений. Результаты оценки гомогенности и стабильности были учтены при оценке неопределенности ключевого опорного значения результатов сличений (KCRV).

Участники сличений провели измерения УЭП полученных от координаторов образцов при температурах 25°C и 15°C. При обработке результатов измерений координатором вводилась коррекция на номинальные значения температуры 25,000°C и 15,000°C.

Результаты измерений, представленные участниками сличений, приведены в табл. 1 и 2 для обеих температур.

KCRV, его неопределенность и степень эквивалентности результатов изме-

рений, выполненных участниками сличений, вычислялись на основе принятых руководящих принципов, изложенных в [4]. В итоге, при сопоставлении методов, основанных на средневзвешенных значениях и медиане, последняя была принята в качестве оценочной функции для KCRV.

Таблица 1

Результаты измерений УЭП образцов при температуре 25°C

Institute	EC S·m ⁻¹	u S·m ⁻¹	U _{95,45%} S·m ⁻¹
SMU	5.2779	0.0027	0.0054
INRiM	5.2910	0.0191	0.0382
NMIJ	5.2959	0.0041	0.0082
SP	5.2960	0.0090	0.018
INPL	5.2989	0.0045	0.009
INMETRO	5.2990	0.0018	0.0052
VNIIM	5.3010	0.0008	0.0016
GUM	5.3027	0.0018	0.0035
PTB	5.3036	0.0017	0.0034
VNIIFTRI	5.3040	0.0011	0.0022
MKEN	5.3040	0.0015	0.0030
DFM	5.3069	0.0017	0.0035
UkrCSM	5.3113	0.00135	0.0027

Таблица 2

Результаты измерений УЭП образцов при температуре 15°C

Institute	EC S·m ⁻¹	u S·m ⁻¹	U _{95,45%} S·m ⁻¹
SMU	4.2766	0.0026	0.0052
NMIJ	4.2772	0.0039	0.0078
SP	4.2830	0.0077	0.0150
INMETRO	4.2849	0.0015	0.0040
INPL	4.2854	0.0045	0.0090
INRiM	4.2856	0.0131	0.0261
PTB	4.2884	0.0009	0.0018
VNIIFTRI	4.2891	0.0009	0.0018
VNIIM	4.2900	0.0008	0.0017
GUM	4.2913	0.0016	0.0031
DFM	4.2914	0.0014	0.0029
MKEN	4.2918	0.0017	0.0034
UkrCSM	4.2919	0.00114	0.0023

В табл. 3 и 4 приведены оценки степени эквивалентности результатов участников сличений, а на рис. 1 представлен график степеней эквивалентности для температуры измерений 15°C.

Таблица 4

Степень эквивалентности результатов НМИ для морской воды при температуре 15°C (оценка по медиане)

Institute	d_i $S \cdot m^{-1}$	d_{i_LOW}	d_{i_UP}
SMU	-0.013	-0.018	-0.0072
NMIJ	-0.012	-0.020	-0.0041
SP	-0.0062	-0.022	0.0086
INMETRO	-0.0043	-0.0082	-0.000036
INPL	-0.0038	-0.013	0.0048
INRiM	-0.0036	-0.030	0.022
PTB	-0.00082	-0.0031	0.0010
VNIIFTRI	-0.00012	-0.0022	0.0019
VNIIM	0.00078	-0.0010	0.0029
GUM	0.0021	-0.00085	0.0055
DFM	0.0022	-0.00055	0.0052
MKEH	0.0026	-0.00060	0.0062
UkrCSM	0.0027	0.000013	0.0052

Таблица 3

Степень эквивалентности результатов НМИ для морской воды при температуре 25°C (оценка по медиане)

Institute	d_i $S \cdot m^{-1}$	d_{i_low}	d_{i_up}
SMU	-0.024	-0.030	-0.019
INRiM	-0.011	-0.049	0.026
NMIJ	-0.0065	-0.015	0.0012
SP	-0.0064	-0.024	0.011
GUM	-0.0035	-0.012	0.0050
INPL	-0.0034	-0.0088	0.0012
INMETRO	-0.0014	-0.0039	0.00072
VNIIM	0.0003	-0.0033	0.0040
PTB	0.0012	-0.0020	0.0050
VNIIFTRI	0.0016	-0.00085	0.0044
MKEH	0.0016	-0.0013	0.0051
DFM	0.0045	0.00055	0.0084
UkrCSM	0.0089	0.0055	0.012

В процессе обработки результатов данные некоторых НМИ были исключены из выборки обрабатываемых данных на основании несоответствия статистическим критериям.

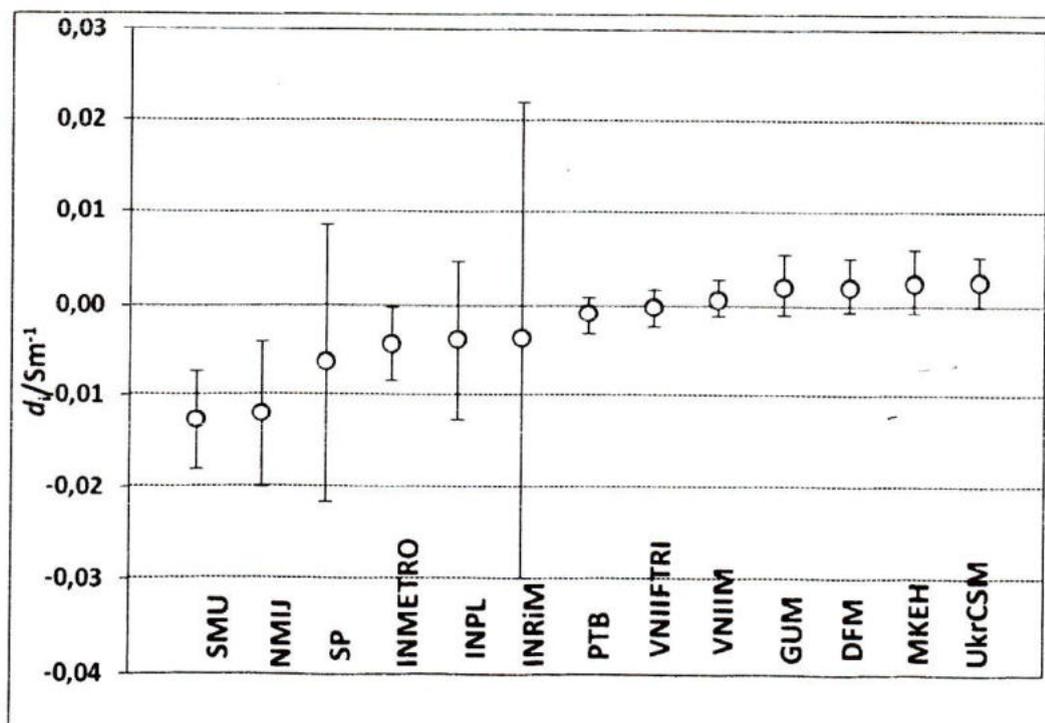


Рис. 1. Эквивалентность результатов сличений для морской воды при температуре 15°C ($P=0,95$)

Результаты UkrCSM в основном эквивалентны результатам других НМИ, но дают основание судить о наличии систематической неопределенности, скорее всего связанной с определением константы вторичной эталонной кондуктометрической ячейки, что подтверждается также результатами сличений CCQM-P142.

Пилотные сличения CCQM-P142.

Как уже отмечалось выше, практическая соленость в настоящее время является общепринятой мерой для определения содержания растворенных солей в морской воде. Согласно PSS-78, это выражается через отношение проводимостей образца морской воды и определенного раствора хлористого калия, которые оба имеют удельную электропроводность (УЭП) приблизительно 4,3 См/м при 15°C. Данные пилотные сличения ставили задачу исследовать эквивалентность таких измерений отношения проводимостей через оценку воспроизводимости независимых результатов измерения.

Так как хорошая повторяемость результатов является желанной целью любых измерений, участникам было предложено выполнить измерения в наиболее стабильных, принятых у них условиях, а не стремиться к обязательной прослеживаемости результатов измерений к СИ. Соответственно допускалось использование любых измерительных систем, включая солемеры. В сличениях [5] участвовали 20 национальных метрологических и океанографических институтов, представляющих 16 стран: PTB, Германия (координатор проекта); INRIM, Италия (поддерживающий институт); CENAM, Мексика; DFM, Дания; GUM, Польша; INMETRO, Брази-

лия; INPL, Израиль; LNE, Франция; МКЕН, Венгрия; NMJ, Япония; NMIT, Таиланд; SMU, Словакия; ВНИИФТРИ, ВНИИМ, Россия; Укрметртестстандарт (UkrCSM), Украина; Alfred-Wegener-Institut, IOW, Германия; IFREMER, Франция; OGS, Италия; OSIL, Великобритания; RSMAS, США.

Институты-участники представили результаты измерений УЭП трех различных образцов морской воды с номинальными значениями УЭП приблизительно 1 См·м⁻¹ (SW-1); 2,5 См·м⁻¹ (SW-2.5) и 4,3 См·м⁻¹ (SW-4,3) при 15°C, что соответствует солености морской воды приблизительно 7 г/кг, 19 г/кг и 35 г/кг. Дополнительно была измерена электропроводность водного раствора хлористого калия с массовой долей KCl приблизительно 32 г/кг, близкой, но не равной массовой доле раствора, указанного в PSS-78 (УЭП приблизительно 4,3 См/м при 15°C). Номинальная температура измерений предлагается равной 15°C, однако, для институтов, имеющих соответствующие технические возможности, было предложено также провести измерения при 5°C, 25°C и 35°C. Лаборатория-координатор вычислила отношения проводимостей образцов морской воды относительно проводимости раствора KCl по представленным участниками данным. Соответствующие статистические результаты вычисления межлабораторной воспроизводимости отношения проводимостей были оценены для каждого образца и температуры измерений (табл. 5). В табл. 6 и на рис. 2 приведены обобщенные данные по эквивалентности результатов сличений.

Таблица 5

Относительная межлабораторная воспроизжимость измерений отношений проводимостей при различных температурах и соленостях для расширенной ($k = 2$) неопределенности медиан

	≈7g/kg(1 S/m at 15°C)	≈19g/kg(2,5 S/m at 15°C)	≈35g/kg(35 S/m at 15°C)
5	0,126%	0,039%	0,021%
15°C	0,013%	0,019%	0,011%
21°C	0,007%	0,004%	0,001%
25°C	0,020%	0,011%	0,014%
35°C	0,248%	0,002%	0,026%

Таблица 6

Степень эквивалентности и расширенная неопределенность ($k = 2$), основанные на медиане

t _{set} °C	SW-1Sm ⁻¹			SW-2,5Sm ⁻¹			SW-4,3Sm ⁻¹		
	Institute	DoE	U(DoE)	Institute	DoE	U(DoE)	Institute	DoE	U(DoE)
5	NMIT	-0.00640	2.8E-04	VNIIFTRI	-0.001648	2.6E-04	VNIIFTRI	-0.000338	3.5E-04
5	VNIIFTRI	-0.00023	3.0E-04	GUM	-0.000253	2.2E-04	GUM	-0.000123	2.2E-04
5	GUM	0.00023	2.8E-04	NMIT	0.000000	2.4E-04	NMIT	0.000123	2.8E-04
5	PTB	0.00035	2.8E-04	PTB	0.000048	2.2E-04	PTB	0.000294	2.1E-04
5				CENAM	0.006024	2.2E-04			
15	NMIT	-0.00674	1.1E-04	AWI	-0.000461	1.1E-04	AWI	-0.000463	1.1E-04
15	AWI	-0.00015	3.0E-05	INMETR	-0.000375	1.5E-04	MKEH	-0.000336	2.0E-04
15	VNIIFTRI	-0.00009	1.0E-04	VNIIFTRI	-0.000366	1.9E-04	UkrCSM	-0.000199	1.6E-04
15	MKEH	-0.00007	6.4E-05	GUM	-0.000348	1.2E-04	GUM	-0.000143	1.5E-04
15	DFM	-0.00005	4.5E-05	DFM	-0.000343	1.3E-04	DFM	-0.000094	1.8E-04
15	UkrCSM	-0.00004	4.0E-05	UkrCSM	-0.000235	1.4E-04	PTB	-0.000053	1.1E-04
15	GUM	0.00000	4.3E-05	PTB	-0.000013	1.1E-04	VNIIFTRI	-0.000050	2.5E-04
15	PTB	0.00012	3.2E-05	MKEH	0.000068	3.5E-04	NMIT	0.000333	3.7E-04
15	INMETR	0.00014	7.3E-05	NMIT	0.000116	2.4E-04	LNE	0.000423	2.9E-04
15	NMIJ	0.00053	1.1E-04	NMIJ	0.000742	1.2E-04	NMIJ	0.000526	2.2E-04
15	VNIIM	0.00056	2.4E-04	VNIIM	0.001290	2.9E-04	INMETR	0.000794	1.5E-04
15	LNE	0.00250	7.7E-05	LNE	0.003262	2.0E-04	VNIIM	0.001873	3.4E-04
15	INRiM	0.00701	1.5E-04	CENAM	0.006603	1.2E-04	INRiM	0.001886	6.2E-04
15				INRiM	0.009196	3.8E-04			
21	IFREMER	-0.00005	2.6E-05	IOW	-0.000046	3.1E-05	IOW	-0.000019	2.9E-05
21	IOW	0.00000	2.6E-05	IFREMER	-0.000007	3.3E-05	OGS	-0.000001	3.7E-05
21	OGS	0.00000	3.1E-05	OGS	0.000007	3.6E-05	OSIL	0.000001	2.9E-05
21	OSIL	0.00003	1.9E-05	OSIL	0.000037	2.9E-05	IFREMER	0.000021	3.2E-05
25	NMIT	-0.00682	9.0E-05	INPL	-0.001413	1.5E-04	AWI	-0.000597	1.4E-04
25	AWI	-0.00020	4.5E-05	MKEH	-0.000534	1.1E-04	MKEH	-0.000327	2.6E-04
25	INPL	-0.00020	5.9E-05	AWI	-0.000442	6.5E-05	GUM	-0.000325	1.6E-04
25	DFM	-0.00009	5.1E-05	GUM	-0.000376	7.6E-05	INPL	-0.000270	2.0E-04
25	VNIIFTRI	-0.00004	9.4E-05	INMETR	-0.000276	1.3E-04	DFM	-0.000183	1.6E-04
25	GUM	-0.00003	5.2E-05	DFM	-0.000271	7.9E-05	PTB	-0.000133	1.4E-04
25	MKEH	-0.00002	8.2E-05	VNIIFTRI	-0.000134	1.6E-04	VNIIFTRI	0.000039	2.6E-04
25	UkrCSM	0.00006	5.5E-05	PTB	0.000132	6.8E-05	UkrCSM	0.000086	1.8E-04
25	INMETR	0.00014	5.8E-05	UkrCSM	0.000202	1.0E-04	NMIT	0.000186	1.7E-04
25	PTB	0.00017	4.6E-05	NMIT	0.000235	1.1E-04	NMIJ	0.000528	8.4E-04
25	NMIJ	0.00057	4.3E-04	NMIJ	0.001045	2.5E-04	INMETR	0.000695	2.0E-04
25	VNIIM	0.00073	2.0E-04	VNIIM	0.001647	2.3E-04	INRiM	0.000913	6.3E-04
25	INRiM	0.00874	1.6E-04	CENAM	0.007405	7.6E-05	VNIIM	0.002122	3.0E-04
25				INRiM	0.011634	3.8E-04			
35	NMIT	-0.00663	5.9E-04	VNIIFTRI	-0.000502	1.6E-04	VNIIFTRI	-0.000270	3.4E-04
35	VNIIFTRI	0.00000	5.9E-04	PTB	-0.000011	3.1E-05	PTB	0.000000	2.6E-04
35	PTB	0.00053	5.8E-04	NMIT	0.000011	7.3E-05	NMIT	0.000237	2.7E-04
35				CENAM	0.007389	4.9E-05			

Очевидно, что процедура калибровки по измерениям Практической Солености – то же самое, что и вторичные измерения УЭП, когда значение УЭП анализируемого раствора определяется через значение электропроводности эталонного раствора. Поэтому смысл сличений заключался также в исследовании эквивалентности результатов вторичной калибровки. Результаты сличений показывают, что на эквивалентность существенно влияет отличие условий, при которых определялась константа кондуктометрической ячейки от условий, в которых проводились измерения УЭП раствора.

Масштаб на рис. 2 был выбран таким, чтобы разброс результатов был виден. Как следствие, некоторые из результатов оказались вне масштаба рисунка. Значения графических границ погрешности результатов соответствуют расширенной неопределенности. Если есть перекрытие значения неопределенности с нулевой линией, можно считать, что результат отвечает CRV и наоборот.

Проведенные пилотные исследования рассматривают, главным образом две проблемы. Во-первых, это определение степени межлабораторной воспроизводимости результатов измерений отношения проводимостей морской воды. Во-вторых, это исследования влияния матрицы (состава среды) и температуры в процессе вторичных измерений.

Рис. 2 показывает, что большое количество представленных участниками значений не согласуется с соответствующими опорными значениями. Это – неожиданное наблюдение. Обычно, систематические неопределенности измерения температуры и сопротивления вносят большой вклад в неопределенность измерения удельной электропроводности. Следовательно, разброс результатов предыдущих сличений в области удельной электропроводности может быть объяснен именно этим вкладом. Однако, для отношения электропроводности существенная часть такого вклада устраняется и эквивалентность отношений электропроводности должна быть намного лучше, чем эквивалентность непосредственных измерений УЭП, то есть должна быть на уровне повторяемо-

сти результатов измерений (для большинства институтов повторяемость находится на уровне 10^{-5}).

Особенно это бросается в глаза в той части графика рис. 2, которая представляет отношение электропроводности 4,3 См/м морской воды и раствора KCl. Очевидно, что разброс результатов превышает расширенную неопределенность значительно. Расхождения, продемонстрированные на рис. 2, тем более удивительны, если принять во внимание, что проводимости этих двух растворов подобны, и большинство систем измерения УЭП оптимизированы для температуры измерения 25°C.

Применение метода медианы для оценки результатов подобных исследований, по мнению авторов настоящей статьи, безусловно в том случае, если предположить, что все участники соответствуют примерно одинаковому уровню квалификации, уровню оборудования и имеют опыт в проведении подобных сличений.

С точки зрения научной осторожности и математической толерантности координаторы сличений могли бы, но не сочли возможным, выделить группу референтных лабораторий и применить методы обработки результатов, которые бы хоть в какой-то мере этот уровень учитывали. Такая оценка была бы справедливой не на основе общности идеологических подходов и долговременных личных научных связей, а на основе достаточно объективных многолетних результатов международных сличений и т.п.

Выводы. Для "успешных" участников ключевых сличений CCQM-K105 открывается возможность регистрации своих калибровочных и измерительных возможностей (СМС) в базе данных МБМВ. При этом, в соответствии с общепринятой практикой, СМС могут распространяться на диапазон, покрывающий один порядок величины УЭП, по сравнению со взвешенным значением по результатам сличений, находящемся номинально в центре (логарифмическом) диапазона.

Исходя из номинальных значений УЭП образцов для сличений, диапазон СМС может составлять от 1 до 15 См·м⁻¹.

По результатам сличений CCQM-P142 можно сделать вывод, что повторяемость измерений электропроводности хуже, чем заявленная большинством институтов, и что константы ячеек в большей степени зависят от температуры, матрицы и величины проводимости, чем ожидалось. Это имеет важные последствия для оценки неопределенности вторичных измерений. До сих пор считалось, что основной вклад в неопределенность вторичных измерений проводимости водных растворов электролитов вносит неопределенность эталонного раствора, в то время как вклад повторяемости является небольшим или даже несущественным. Напротив, проведенные исследования требуют, чтобы при вторичных измерениях рассматривался дополнительный вклад повторяемости на уровне неопределенности CRV, т.е. в пределах от 0,01% до 0,1%. Таким же, к сожалению, является оцененный диапазон воспроизводимости для измерений отношений УЭП.

При расчетах CRV по взвешенным средним величинам неопределенность возрастает, поэтому такой расчет обеспечил бы порядок неопределенностей, которые лучше бы удовлетворяли фактическому разбросу результатов. Результаты большей части институтов согласовывались бы в этом случае с CRV. К сожалению, с другой стороны не было возможным найти последовательную подходящую группу результатов для вычисления взвешенных средних величин, которые бы являлись арбитражной оценкой для CRV.

Таким образом, основным результатом исследований есть вывод о том, что национальные метрологические институты в настоящее время еще не в состоянии обеспечить эквивалентные и последовательные результаты измерения отношения проводимостей с удовлетворительной неопределенностью, не говоря уже о соответствии строгим требованиям океанографии. По мнению координаторов сличений, нет даже небольшой группы институтов, которые могли бы в полной мере решить эту задачу.

Результаты UkrCSM могли бы войти в такую группу результатов, которые точнее бы определили арбитражные значения CRV. По крайней мере, эквива-

лентность между собой результатов, полученных НМИ, которые располагаются в центральной части графиков, построенных по медианам, существенно выше, чем оцененная по всем результатам сличений. Такая оценка, на наш взгляд, дала бы более полезную информацию для совершенствования методов и средств измерений для остальных заинтересованных участников сличений.

Нужно упомянуть, что измерения на солемерах Guildline AUTOSAL 8400B, проведенные OSIL (Ocean Scientific International Ltd.) и др., составляют исключение. Даже при том, что некоторые из результатов являются также несогласованными между собой при более низкой солёности, солемеры демонстрируют экстраординарную эквивалентность на уровне неопределенности 10^{-5} . Однако, эти приборы использованы единожды и в будущем недоступны для таких исследований. Единственный солемер другого типа, использованный в этих сличениях, обеспечил результаты, которые скорее соответствуют разбросу данных, приведенных выше. Следовательно, результаты настоящих исследований не могут сформировать нижний предел для сопоставимости результатов измерений практической солёности для случаев, если в океанографии будут использоваться другие приборы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The Practical Salinity Scale 1978 (PSS-78)*.
2. *Seitz S., Spitzer P., Brown R.* Final report of CCQM-P111 study on "Traceable determination of Practical Salinity and mass fraction of major seawater components" // Germany, Braunschweig, PTB. June 2009. – 19 p.
3. *Metrologia*, 2014, 51, Tech. Suppl., 08016 CCQM-K105 Final Report, 2014. – 20 p.
4. *Cox M.G.* "The evaluation of key comparison data, "Metrologia", vol. 39, pp. 589 – 595, 2002.
5. *Seitz S., Spitzer P., Brown R.* Final report of CCQM-P142 study on "Equivalence of conductance ratio measurement results of seawater" // Germany, Braunschweig, PTB. March 2014, 27 p.