

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ СЛИЧЕНИЙ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОСОЛЕМЕРОВ ТИПА AUTOLAB И ГМ-65

В.И.Забурдаев

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net*

Лабораторные электросолемеры типа Autolab (CSIRO, Австралия) [1] и ГМ-65 ("Гидрометприбор", СССР) [2, 3] являются индуктивными электросолемерами с параметрической автокомпенсацией зависимости относительной электрической проводимости (ОЭП) морской воды от температуры. Последнее их свойство позволяет измерять соленость по ОЭП без применения активного прецизионного термостатирования и без перекалибровки прибора при изменении температуры пробы в рабочей камере в диапазоне (1±3) °C. Эта эксплуатационная особенность способствовала массовому использованию этих приборов в сложных условиях судовых лабораторий.

Солемеры Autolab широко применялись в океанографической практике в период 1962-1975 гг. в процессе выполнения исследований по многим известным международным проектам, включая GEOSECH, MODE и POLYMODE. Выпускались они в двух модификациях: узкодиапазонный (измерение солености в диапазоне 27±42) и широкодиапазонный ( $S \approx 2\text{--}42$ ). Установленная разработчиком [1] погрешность измерения солености лежала в пределах ±0,003.

Лабораторные электросолемеры типа ГМ-65 (первоначальные названия узкодиапазонного варианта СОЛ-65, широкодиапазонного - СОЛЕКС-1 [2]) производились на заводе "Гидрометприбор" Госкомгидромета СССР (г. Сафоново Смоленской области). В основу структурной и электрической схем положены схемы широкодиапазонного солемера Autolab, а конструктивное исполнение было выполнено в более компактной форме. Этот тип прибора широко использовался в СССР в 1968-1991 гг. в ведомствах Госкомгидромета, Минрыбхоза, Гидрографической службы, в Академии наук СССР и союзных республик и др. как для измерения солености океанских вод, так и окраинных, средиземных и внутренних морей. Указанная изготовителем основная погрешность этого прибора [3] в эквиваленте солености (ОЭП) составляла  $\pm 0,02 (\pm 50 \cdot 10^{-5})$  и  $\pm 0,03 (\pm 75 \cdot 10^{-5})$  в диапазонах изменения солености (ОЭП) от 28 до 43 (от 0,8 до 1,2) и от 5 до 28 (от 0,17 до 0,8) соответственно. В диапазоне солености (ОЭП) от 2 до 5 (от 0,07 до 0,17) погрешность измерения солености (ОЭП) может достигать  $\pm 0,04 (\pm 100 \cdot 10^{-5})$ .

Столь существенное отличие в классе точности практически однотипных приборов Autolab и ГМ-65 (включая конкретные параметры принципиальных электрических схем) может быть вызвано либо разным качеством комплектующих изделий, изготовления, настройки, либо в одном случае завышением, а в другом - занижением метрологических характеристик производителями. Опубликованные материалы по сличениям

электросолемеров как в береговых, так и в судовых условиях говорят о том, что фактические расхождения в показаниях солемеров значительно превосходят (в 2 + 10 раз) их паспортные погрешности. Это относится как к приборам Autolab, так и ГМ-65. Рассмотрим более подробно результаты этих сличений, так как они могут помочь оценить возможные погрешности измерений в тех массивах информации, которые получены с помощью этих типов приборов и хранятся в ведомственных, национальных и международных банках данных. Сличия лабораторных электросолемеров различных типов производились неоднократно. Однако наиболее ценные с точки зрения одновременного использования приборов типа Autolab, ГМ-65 и других, в том числе и прецизионного компаратора проводимости Р.С.С. национального океанографического центра (NOIC) США, являются сличия, выполненные по инициативе К.Грассхофа и Ф.Германа в 1974-1975 годах [4]. Интеркалибрация солемеров, используемых в процессе выполнения международной программы ТРОПЭКС-1974 производилась в 1974 году. МГИ НАН Украины располагает данными\* результатах сличений двух солемеров типа ГМ-65 (один с НИС "Михаил Ломоносов" МГИ АН УССР, другой с НИС "Пассат" Госкомгидромета СССР) и Р.С.С. (NOIC, USA) как образцового прибора. Наличие

прецизионного компаратора проводимости Р.С.С. в обоих экспериментах позволяет связать данные сличений, выполненных К.Грассхо-фом и Ф. Германом, с данными сличений по программам ТРОПЭКС-1974. К.Грассхоф и Ф.Герман производили сличение по пробам с малой (Балтийская вода,  $S \approx 8,0$ ) и с большой (Средиземноморская вода,  $S \approx 38,1$ ) соленостью. Пять ампул Балтийской воды и пять ампул Средиземноморской вместе с четырьмя ампулами стандартной (нормальной) воды с соленостью 35 (серия Р-64) для калибровки были посланы на каждый солемер, участвующий в сличениях. Результаты сличений приведены в табл. 1 и табл. 2. В эксперименте по ТРОПЭКС-1974 на каждый солемер выделялось по двенадцать подготовленных проб, охватывающих диапазон солености от 32 до 38. В табл.3 показаны данные сличений по этому эксперименту.

В табл. 4 приведены результаты измерений с помощью индуктивного солемера солености, а также хлорности, выполненные НИС "Atlantis-II" [5] в придонном перемешанном слое в Черном море в 1969 году и результаты измерений солености с помощью солемера ГМ-65, полученные в Черноморском этапе 28 рейса НИС "Академик Вернадский" в 1983 году [6]. В этой же таблице указаны разницы между значениями солености,

\* Информация получена из официального письма заместителя директора управления морской техники NOAA США У.М.Николсона заместителю директора Института Океанологии АН СССР И.Е.Михальцеву от 6 февраля 1975 года.

полученными на НИС "Atlantis-II", "Академик Вернадский" и значениями солености Черноморской воды на глубинах  $1750 \div 2100$  м, полученных в результате высокоточных измерений по программам HydroBlack и CoMSBlack в 1991-1993 гг. [7]. Привлечение этих материалов для оценки метрологических характеристик солемеров Autolab и ГМ-65 стало возможным благодаря обнаруженному НИС "Knorr" (WHOI, USA) в 1988г. [8] и надежно зарегистрированному в экспедициях по упомянутым Черноморским проектам придонного перемешанного слоя в диапазоне глубин  $1750\text{-}2100$  м с соленостью  $S_{1978} = 22,333 \pm 0,002$  и потенциальной температурой  $\Theta = 8,895 \pm 0,003$  по всей глубинной части Черного моря.

Учитывая медленные процессы водообмена на этих глубинах, этот слой можно считать естественным бассейном с высоким постоянством солености в пространстве и времени и использовать в качестве природной reference точки для испытаний лабораторных солемеров и зондирующих СТД-систем.

Для исключения погрешностей сличений, вызванных различием практических шкал солености, используемых при измерениях в Черном море на НИС "Atlantis II" (шкала Кокса 1966 г. [9], на НИС "Академик Вернадский" (шкала Кокса 1966 г.) и в программах HydroBlack, CoMSBlack (шкала ШПС-1978), все данные были приведены к шкале ШПС-1978.

Для удобства визуального анализа результатов сличения все данные по расхождениям показаний солемеров представлены на рис. 1.

Как видно из табл. 1-4 и из рисунка, реальные расхождения в показаниях солемеров значительно превосходят их "паспортные" погрешности и носят относительно закономерный характер: с удалением от точки калибровки солемеров ( $R_i \approx 1,0$ ,  $S \approx 35,0$ ) расхождения возрастают.

В эксперименте К.Грассхофа и Ф.Германа использовались 11-13 солемеров типа Autolab и один ГМ-65. Все они показали высокую индивидуальную воспроизводимость измерений. Отклонения от среднего значения при 12 измерениях проводимости одной и той же пробы между калибровками редко превышали 0,003 в эквиваленте солености. Следовательно, большие расхождения в средних значениях солености каждого прибора (это особенно относится к приборам Autolab) со средними показаниями Р.С.С. вызваны вероятнее всего неисключенными инструментальными погрешностями индивидуально каждого прибора.

В эксперименте К.Грассхофа, Ф.Германа солемер ГМ-65 показал расхождения 0,007 и -0,001 для проб с соленостью 8 и 38 соответственно. Эти значения меньше паспортных погрешностей и, как это можно видеть по другим сличениям, не отражают действительных метрологических характеристик этого типа прибора.

Измерения солености проб Черноморской воды, отобранный в экспедиции НИС 00 "Atlantis-II", производились, судя по работе [5], не на борту судна, а в Вудсхольмском океанографическом институте (WHOI, США) с помощью индуктивного солемера

(конкретный тип прибора не указан, но учитывая установившуюся в среде океанологов традицию под индуктивным солемером подразумевать только приборы типа Autolab, можно считать, что именно этот тип прибора использовался). Принимая во внимание факт постоянства солености Черноморской воды в перемешанном придонном слое в диапазоне от 1750 до 2100 м [7] и учитывая сравнительно высокую индивидуальную воспроизводимость солемеров Autolab, следует отметить, что среднее квадратическое отклонение случайной составляющей расхождения слишком велика и достигает  $\sigma_s = 0.021$ . Привлекая данные параллельного прецизионного определения хлорности тех же проб воды (пробы на хлор отбирались непосредственно из рабочей камеры солемера сразу после измерения кондуктометрической солености), выполненные К.Кремлингом с прецизионностью (воспроизведимостью) не хуже  $\Delta Cl = \pm 0,0005\%$ , находим, что среднее квадратическое отклонение разброса хлорности в отобранных пробах составляет  $\sigma_{Cl} = 0.0114\%$  при средней хлорности  $Cl = 12,3451\%$ .

Сопоставление рассеяний независимых измерений кондуктометрической солености и хлорности показывает, что  $\sigma_s / \sigma_{Cl} = 1.84$  и практически точно соответствует хлорному коэффициенту солености по шкале Кокса ( $S = 1.80655 \cdot Cl$ ). Это в свою очередь говорит о том, что причина большого рассеяния солености, измеренной с помощью солемера Autolab, определяется не столько инструментальной погрешностью солемера, сколько изменчивостью солености

(хлорности) в пробах воды как в момент отбора (например, из-за возможной негерметичности пробоотборников) или в процессе хранения и транспортировки отобранных проб от места сбора до места измерений.

Среднее значение солености в придонном перемешанном слое Черного моря по данным НИС "Atlantis-II" составляет  $S = 22,396$  вместо определенного позднее значения  $S_{1978} = 22,333$  [7]. Причина расхождений средних значений солености  $\Delta S = 0,063$  может заключаться и в систематической погрешности собственно солемера и в изменчивости солености проб в процессе отбора, хранения и транспортировки. В настоящее время только по данным экспедиции НИС "Atlantis-II" установить более точно истинную причину расхождений невозможно.

Как видно из табл. 3, расхождения в показаниях солености в придонном перемешанном слое солемером ГМ-65 в Черноморском этапе 28-го рейса НИС "Академик Вернадский" в 1983 году по сравнению с измерениями 1991-1993 гг. практически полностью совпадают с показаниями солемера Autolab (среднее расхождение составляет  $\Delta S = 0,047$  при среднем квадратическом отклонении случайной составляющей  $\sigma_s = 0,016$ ). В этом случае соленость проб измерялась непосредственно на судне без длительного хранения и транспортирования и в качестве возможных причин большого рассеяния остаются только изменчивость солености проб в процессе их отбора кассетой батометров и дальнейшего отбора в штатную посуду, а также в силу инструментальных особенностей прибора.

Сличение солемеров ГМ-65 и Р.С.С. в процессе проведения эксперимента ТРОПЭКС-1974, показало (см. рис. 1, табл. 4), что наряду с трендом (возрастание расхождений с уменьшением солености) расхождения имеют скачкообразный характер в случае малой разности солености контрольных проб (в пределах  $0,01 \div 0,2$ ). При этом скачки для обоих сличаемых приборов составляют  $\Delta S \approx 0,01$  и наблюдаются на одних и тех же значениях солености (ОЭП) или на одних и тех же номерах контрольных проб. Этот факт говорит о наличии инструментальных погрешностей солемера ГМ-65, ответственных за проявление дифференциальной нелинейности в статической характеристике преобразования. В принципе этот вид погрешности должен быть присущ и солемерам типа Autolab, поскольку они имеют одинаковую функционально-электрическую схему, однако установить это экспериментально не удалось в связи с отсутствием в МГИ НАН Украины солемеров Autolab.

Полученные результаты лабораторных и натурных сличений электросолемеров типа Autolab и ГМ-65 наводят на мысль, что при высокой индивидуальной воспроизводимости показаний главными причинами больших расхождений могут быть:

1) аддитивная и мультипликативная погрешности приборов, вызванные отклонением индивидуальных статических характеристик преобразования (СХП) приборов от коминальной линейной СХП. В работе [9] приводятся сведения о том, что в приборах типа ГМ-65 эти

погрешности могут быть вызваны смещением "нуля", изменчивостью выходного импеданса индуктивного делителя (причем как активной, так и реактивной составляющей его), в зависимости от значения коэффициента деления (т.е. в зависимости от относительной электропроводности пробы воды), а также в зависимости от индуктивности жидкостного витка воды и обмотки компенсации в трансформаторном датчике ОЭП. Подобные погрешности имеются и в солемерах Autolab, поскольку функционально-электрическая схема их аналогична схеме ГМ-65;

2) калибровка приборов по одной точке шкалы с помощью нормальной воды с  $S = 35,0$ ,  $R_{15} = 1,0$  не выявляет особенностей индивидуальных СХП приборов во всем диапазоне измерений, в результате чего ни аддитивные, ни мультипликативные погрешности в дали от значения  $R_{15} = 1,0$  из результатов измерений не исключаются. В связи с этим в накопленных в банках данных результатах измерений малой солености ( $S = 8 \div 25$ ), например вод Балтийского, Азовского, Черного, Каспийского морей или высокой солености (воды Средиземного, Красного морей), полученных с помощью приборов Autolab и ГМ-65 до внедрения шкалы практической солености ШПС-1978 и до введения в 1980-1982 гг. четырех стандартов нормальной воды ( $S = 10$ ,  $S = 30$ ,  $S = 35$ ,  $S = 38$ ) для калибровки приборов, возможны ошибки в солености, достигающие минус  $0,01 \div 0,08$ . Эти погрешности значительно превышают приписанный данным приборам класс точ-

Таблица 1

Результаты сличений электросолемеров  
по контрольной пробе Балтийской воды  
(по K.Grasshoff, F.Herman [4])

Контрольная проба	Показания сличаемых приборов, S, %				Расхождения, $\Delta S$ , %		
	Autolab	ГМ-65	Autosal (Guildline)	P.C.C.	$\Delta S_{A-L}$	$\Delta S_{GM}$	$\Delta S_{A-S}$
Вода из Балтийского моря $S \approx 8,0$	7,987	7,995	7,988	7,988	-0,001	0,007	0,000
	7,984	-	-	-	-0,004	-	-
	7,992	-	-	-	0,004	-	-
	8,004	-	-	-	0,016	-	-
	8,010	-	-	-	0,022	-	-
	7,997	-	-	-	0,009	-	-
	8,021	-	-	-	0,033	-	-
	8,058	-	-	-	0,070	-	-
	8,054	-	-	-	0,066	-	-
	8,068	-	-	-	0,080	-	-
	7,984	-	-	-	-0,004	-	-
	7,993	-	-	-	0,005	-	-
Среднее значение	8,012	7,995	7,988	7,988	0,025	0,007	0,000
$\sigma_S$	0,031	-	-	-	0,031	-	-

Таблица 2

Результаты сличений электросолемеров  
по контрольной пробе Средиземноморской воды  
(по K.Grasshoff, F.Herman [4])

Контрольная проба	Показания сличаемых приборов, S, %				Расхождения, $\Delta S$ , %		
	Autolab	ГМ-65	Autosal (Guildline)	P.C.C.	$\Delta S_{A-L}$	$\Delta S_{GM}$	$\Delta S_{A-S}$
Вода из Средиземного моря $S \approx 38,1$	38,134	38,128	38,132	38,129	0,005	-0,001	0,003
	38,132	-	-	-	0,003	-	-
	38,118	-	-	-	-0,011	-	-
	38,119	-	-	-	-0,010	-	-
	38,127	-	-	-	-0,002	-	-
	38,124	-	-	-	-0,005	-	-
	38,127	-	-	-	-0,002	-	-
	38,126	-	-	-	-0,003	-	-
	38,117	-	-	-	-0,012	-	-
	38,130	-	-	-	0,001	-	-
	38,131	-	-	-	0,002	-	-
Среднее значение	38,126	38,128	38,132	38,129	-0,003	-0,001	0,003
$\sigma_S$	0,006	-	-	-	0,006	-	-

Таблица 3

Соленость, хлорность Черноморской воды в придонном перемешанном слое по данным НИС "Atlantis-II" (1969 г. [5]) и НИС "Академик Вернадский" (1983 г. [6])

Соленость, хлорность Черноморской воды в ППС по данным НИС "Atlantis-II"						Соленость Черноморской воды в ППС по данным 28 рейса НИС "Академик Вернадский"					
№ станицы	Глубина, м	Atт. S <sub>1966</sub>	Atт. S <sub>1978</sub>	Хлорность, ‰ Cl	Atт. Δ S <sub>1978</sub>	№ станицы	Глубина, м	Aтт. S <sub>1966</sub>	Атт. S <sub>1978</sub>	Соленость Черноморской воды в ППС по данным 28 рейса НИС "Академик Вернадский"	Aтт. Δ S <sub>1978</sub>
1432/1	2009	22,371	22,382	12,3429	0,049	3962	1781	22,386	22,398	0,065	
1445/1	1812	22,364	22,375	12,3357	0,042	3963	1747	22,357	22,369	0,036	
1464/0	2078	22,386	22,397	12,3387	0,064	3977	2000	22,357	22,369	0,036	
1466/2	1997	22,420	22,431	12,3627	0,098	3978	1757	22,352	22,364	0,031	
1466/2	2098	22,399	22,410	12,3540	0,077	3979	1958	22,358	22,370	0,037	
1478/2	1938	22,372	22,383	12,3368	0,050	3985	1748	22,368	22,380	0,047	
-	-	-	-	-	-	3992	1947	22,390	22,402	0,069	
-	-	-	-	-	-	3992	1762	22,382	22,394	0,061	
Среднее значение	22,3853	22,3963	12,3451	0,063	-	-	-	22,369	22,380	0,047	
Среднее квадратическое отклонение	0,021	0,021	0,0114	0,021	-	-	-	0,0157	0,0157	0,0157	

Таблица 4

Результаты сличений солемеров ГМ-65 на НИС "Михаил Ломоносов" ( $S_{GM\text{ М.Л.}}$ )  
и НИС "Пассат" ( $S_{GM\text{ П.}}$ ) с показаниями Р.С.С.  
(сличение при проведении программы ТРОПЭКС-1974)

№ пробы	$S_{\text{проб}}^*$	$S_{GM\text{ М.Л.}} - S_{PCC}$	$S_{GM\text{ П.}} - S_{PCC}$	$S_{GM\text{ М.Л.}} - S_{GM\text{ П.}}$
1	37,95	0,011	0,002	0,009
2	36,67	0,019	0,008	0,011
3	35,05	0,007	0,002	0,005
4	33,54	0,031	0,017	0,014
5	31,99	0,022	0,010	0,012
6	36,53	0,010	0,010	0,000
7	38,06	0,014	0,014	0,000
8	36,70	0,021	0,010	0,011
9	35,04	0,018	0,010	0,008
10	33,59	0,032	0,015	0,017
11	32,09	0,033	0,021	0,011
12	33,54	0,021	0,014	0,007
Среднее значение, $\Delta S$	0,020	0,011	0,0087	
Среднее квадр. отклонение, $\sigma$	0,009	0,0056	0,0052	

$S^*$  - ориентировочное значение солености.

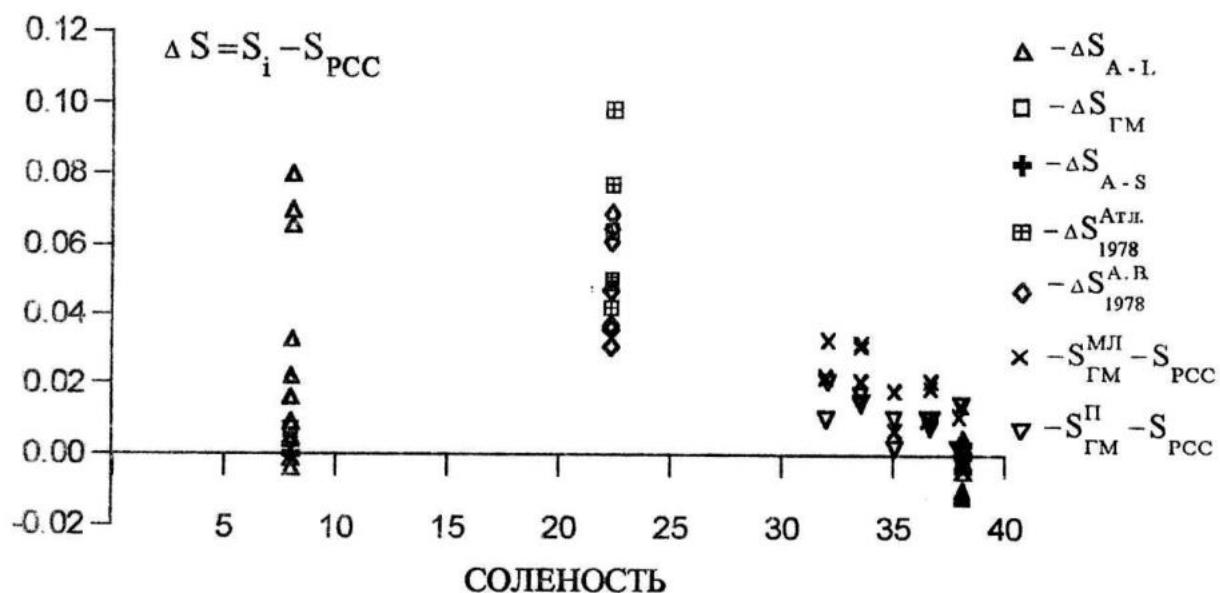


Рис. 1. Расхождения в показаниях приборов

ности. Этот факт необходимо учитывать при анализе и сопоставлении архивных данных с современными результатами измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brown N.L., Hamon B.V. An inductive salinometer. Deep-Sea Research, 1961, V 8, N 1, P. 65-75.
2. Козловская И.А., Ермаков В.М. Приборы СОЛ-65 и СОЛЕКС-1 для определения солености морской воды по относительной электропроводности. В кн.: Автоматизация научных исследований морей и океанов. Симпозиум 1968 г.), часть I. Издание МГИ АН УССР, Севастополь, 1969, С. 113-118.
3. Электросолемер ГМ-65. Паспорт Л82.840.004ПС 1976, 66 листов.
4. UNESCO Technical papers in marine science, N 24. Seventh report of the joint panel on oceanographic tables and standards. K.Grasshoff, F.Herman. alinometer intercalibration experiment. Paris. UNESCO, 1975, P. 19-23.
5. Kremling Klaus. Relation between chlorinity and conductometric salinity in Black Sea water // Black Sea, geol., chim. and biol. - Tulsa, Oklahoma, 1974. - P. 151-154.
6. Гидрологические таблицы. Архивные материалы МГИ НАН Украины по Черноморскому этапу 28 рейса НИС "Академик Вернадский" 23.11 - 14.12.1983 г. Инв. № 23870.
7. Иванов Л.И., Шкворец И.Ю. Термохалинная структура глубинных и придонных вод Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1995. № 6. С. 53-60.
8. Murray I.W., Zafer T.Ozsoy E. Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea. Deep-Sea Research, 38 (suppl), 1991, pp. 5663-5689.
9. Забурдаев В.И. Исследования метрологических характеристик лабораторного солемера ГМ-65 как компаратора электропроводности морской воды. Тезисы докладов Всесоюзной школы "Технические средства и методы исследования Мирового океана", М., ИО АН СССР, 1987, т. 1, С. 43.