

**К ВОПРОСУ МЕТОДИКИ
КАЛИБРОВКИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ
ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ
CTD-КОМПЛЕКСОВ В
ЛАБОРАТОРНЫХ И МОРСКИХ
УСЛОВИЯХ**

В.И. Забурдаев, К.А. Кузьмин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В работе рассматривается методика и алгоритмы прямого вычисления относительной электропроводимости морской воды R , R_t в калибровочных баках или в море в месте нахождения CTD-измерителя по известным значениям солёности S или относительной электропроводимости R_{15} , температуры воды t и гидростатического давления P в соответствии со шкалой практической солёности ШПС-1978.

Введение. В соответствии со шкалой практической солёности ШПС-1978 [1] установлена связь между практической солёностью S и относительной электропроводимостью R_t , температурой воды t (МПТШ-1968) при атмосферном давлении ($P=0$) в следующем виде

$$S = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot R_t^{i/2} + \frac{t-15}{1+k(t-15)} \cdot \sum_{j=0}^5 b_j \cdot R_t^{j/2} \quad (1)$$

где $r_t = 0,6766097 + 2,00564 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1,104259 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,9698 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,0031 \cdot 10^{-9} \cdot t^4$; (4)

$$R_p = 1 + \frac{P(2,07 \cdot 10^{-4} - 6,37 \cdot 10^{-8} \cdot P + 3,989 \cdot 10^{-12} \cdot P^2)}{1 + 3,426 \cdot 10^{-2} \cdot t + 4,464 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + (4,215 \cdot 10^{-1} - 3,107 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot R} ; \quad (5)$$

где $R_t = \frac{\chi_{S,t,0}}{\chi_{35,t,0}}$ – относительная электро-

проводимость морской воды при температуре t ;

$\chi_{S,t,0}$, $\chi_{35,t,0}$ – удельные электропроводимости морской воды с солёностью S при температуре t и атмосферном давлении ($P=0$) и с солёностью точно 35 при тех же значениях t и P ;

$$a_0 = 0,0080; \quad b_0 = 0,0005; \quad k = 0,0162.$$

$$a_1 = -0,1692; \quad b_1 = -0,0056;$$

$$a_2 = 25,3851; \quad b_2 = -0,0066;$$

$$a_3 = 14,0941; \quad b_3 = -0,0375;$$

$$a_4 = -7,0261; \quad b_4 = 0,0636;$$

$$a_5 = 2,7081; \quad b_5 = -0,0144;$$

Измерительные каналы электропроводимости CTD-комплексов измеряют относительную электропроводимость

$$R = \frac{\chi_{S,t,P}}{\chi_{35,15,0}}, \quad (2)$$

где $\chi_{S,t,P}$ – удельная электропроводимость морской воды или раствора в калибровочном баке с солёностью S при температуре t и давлении P ;

$\chi_{35,15,0}$ – удельная электропроводимость морской воды при $S = 35$, $t = 15$ °C и $P = 0$.

В связи с этим при калибровке необходимо знать непосредственное значение R , которое связано с R_t следующей формулой

$$R = R_t \cdot r_t \cdot R_p, \quad (3)$$

где t – в °С (МПТШ-1968);

P – в барах (1 бар = 10^5 Па);

$$r_t = \frac{\chi_{35,t,0}}{\chi_{35,15,0}};$$

$$R_p = \frac{\chi_{S,t,P}}{\chi_{S,t,0}}.$$

К сожалению, при разработке ШПС-1978 была установлена связь солёности морской воды только с относительной электропроводностью R_t и температурой t , а при градуировке измерительного канала необходимо знание R_t при известных солёности S и температуре t [2].

В связи с тем, что прямой формулы $R_t = f(S, t)$ не было получено, в методических материалах ЮНЕСКО по океанографии [3] было рекомендовано пользоваться методом итераций для вычисления R_t по формуле (1).

В принципе для ограниченного количества калибровочных точек при использовании высокостабильных термостатов в процессе калибровки метод итераций не приводит к серьёзному увеличению вычислительных операций, однако при калибровке *in situ*, когда изменяется температура, метод последовательного приближения из-за большого числа необходимых циклов вычисления (до 10 [3]) требует значительного времени, что может привести к значительному сокращению получаемой информации по R_t и, следовательно, к возможному увеличению погрешности калибровки.

П.А. Калашниковым в работе [4] впервые приведена полученная им на основе ШПС-1978 таблица зависимости $R = R_t \cdot r_t$ в функции от солёности в диапазоне тем-

пературы от 15 до 35 °С, которая не охватывает всего диапазона температуры.

Главная цель настоящей работы заключается в нахождении прямой формулы для вычисления $R_t = f(S, t)$ или $R_t = f(R_{15}, t)$ в диапазоне изменения солёности от 2 до 42 единиц практической солёности при температуре $(-2 \div 35)$ °С со средней квадратической погрешностью не более $\sigma_S \leq 0,66 \cdot 10^{-3}$ *eps* в эквиваленте солёности, что соответствует средней квадратической погрешности $\sigma_{R_t} \leq 1,6 \cdot 10^{-5}$, т.е. с погрешностью установления ШПС-1978.

Результаты решения поставленной задачи. За основу алгоритма вычисления относительной электрической проводимости R_t , R приняты формулы ШПС-1978 (1)–(5), на основании которых были получены следующие соотношения

$$R_{15} = \sum_{j=0}^6 C_j \cdot S^{j/2}, \quad (6)$$

где R_{15} – относительная электрическая проводимость при температуре $t = 15$ °С;

$$C_0 = -0,0012165;$$

$$C_1 = 3,741764 \cdot 10^{-3};$$

$$C_2 = 3,642615 \cdot 10^{-2};$$

$$C_3 = -2,466776 \cdot 10^{-3};$$

$$C_4 = 2,953107 \cdot 10^{-4};$$

$$C_5 = -2,508065 \cdot 10^{-2};$$

$$C_6 = 8,1518546 \cdot 10^{-7}$$

$$R_t = \sum_{j=0}^6 C_j \cdot (S + \Delta S)^{j/2}, \quad (7)$$

где C_j – тоже, что в формуле (5);

$$\Delta S = \frac{t-15}{1+0,0162(t-15)} \cdot \left\{ \sum_j^5 b_j \cdot R_{15}^{j/2} + R_{15} (R_{15} - 1) (0,5 - R_{15}) * \right. \\ \left. * [3,4 \cdot 10^{-5} (t-15) - 6,5 \cdot 10^{-7} (t-15)^2] \right\}, \quad (8)$$

где b_j – тоже, что в выражении (1).

Среднее квадратическое отклонение погрешности выражения (6), полученного из выражения (1) при $t = 15^\circ\text{C}$, составляют $\sigma_{R_{15}} = 3,64 \cdot 10^{-7}$, что в эквиваленте солености соответствует $\sigma_S = 1,4 \cdot 10^{-5}$ *енс*. Максимальное отклонение не превышает $\pm 7 \cdot 10^{-7}$ и $\pm 2,8 \cdot 10^{-5}$ *енс* в эквиваленте относительной электрической проводимости и солености соответственно.

Среднее квадратическое отклонение погрешности выражения (7) составляет $\sigma_{R_t} = 2,05 \cdot 10^{-6}$ и $\sigma_S = 8,2 \cdot 10^{-5}$ *енс* в эквиваленте относительной электрической проводимости и солености соответственно.

На рисунках 1 и 2 показан характер изменчивости погрешности выражений (6) и (7) в эквиваленте солености в зависимости от величины солености S при температуре $t = +15^\circ\text{C}$ (рис. 1) и в зависимости от солености S и температуры морской воды t (рис. 2). Как видно из рисунка 2, максимальная погрешность вычисления R_t наблюдается в области солености (2–10) *енс* при температуре (-2–0) $^\circ\text{C}$ и 35°C .

В остальных случаях максимальная погрешность не выходит за пределы $\pm 0,00012$ *енс* в эквиваленте солености.

Таким образом, среднее квадратическое отклонение погрешности выражений (5) и (6) для прямого вычисления $R_t = f(S, t)$ не превышает $8,2 \cdot 10^{-5}$ *енс* в эквиваленте солености и, следовательно, практически не окажет дополнительного влияния на точность воспроизведения шкалы относительной электрической проводимости R_t , поскольку, как было сказано ранее, среднее квадратическое отклонение исходной формулы (1) ШПС-1978 составляет в эквиваленте солености $0,66 \cdot 10^{-3}$ *енс* [1].

Если калибровка измерителя относительной электрической проводимости производится в лабораторных условиях при атмосферном давлении ($P = 0, R_p = 1$), тогда

$$R = r_t \cdot R_t, \quad (9)$$

где r_t и R_t представлены формулами (4) и (7).

Если калибровка производится в морских условиях, тогда относительная электрическая проводимость R вычисляется по следующей формуле [3]

$$R = \frac{1}{2A} \left[\sqrt{(B - A \cdot r_t \cdot R_t)^2 + 4r_t \cdot R_t \cdot A(B + C)} - (B - A \cdot r_t \cdot R_t) \right], \quad (10)$$

$$\text{где } A = (4,215 \cdot 10^{-1} - 3,107 \cdot 10^{-3} \cdot t); \quad (11)$$

$$B = 1 + 3,426 \cdot 10^{-2} \cdot t + 4,464 \cdot 10^{-4} \cdot t^2; \quad (12)$$

$$C = P(2,07 \cdot 10^{-5} - 6,370 \cdot 10^{-10} \cdot P + 3,989 \cdot 10^{-15} \cdot P^2); \quad (13)$$

t – температура, $^\circ\text{C}$ (МПТШ-1968);

P – гидростатическое давление, дбар (1 дбар = 10^4 Па = 0,01 МПа);

r_t – формула (4);

R_t – формулы (6–8);

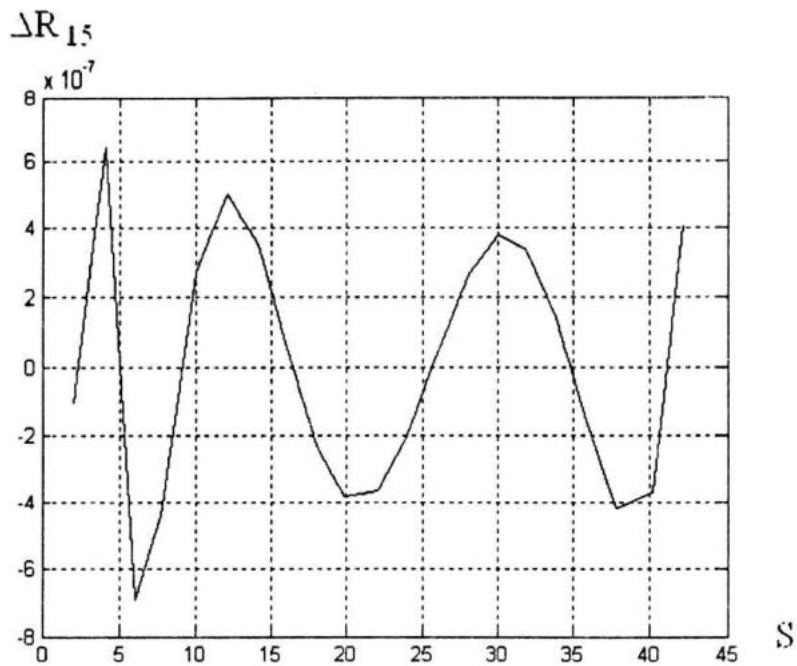


Рисунок 1 – Погрешность вычисления R_{15} по выражению (7) в диапазоне изменчивости солёности от 2 до 42 *psc*

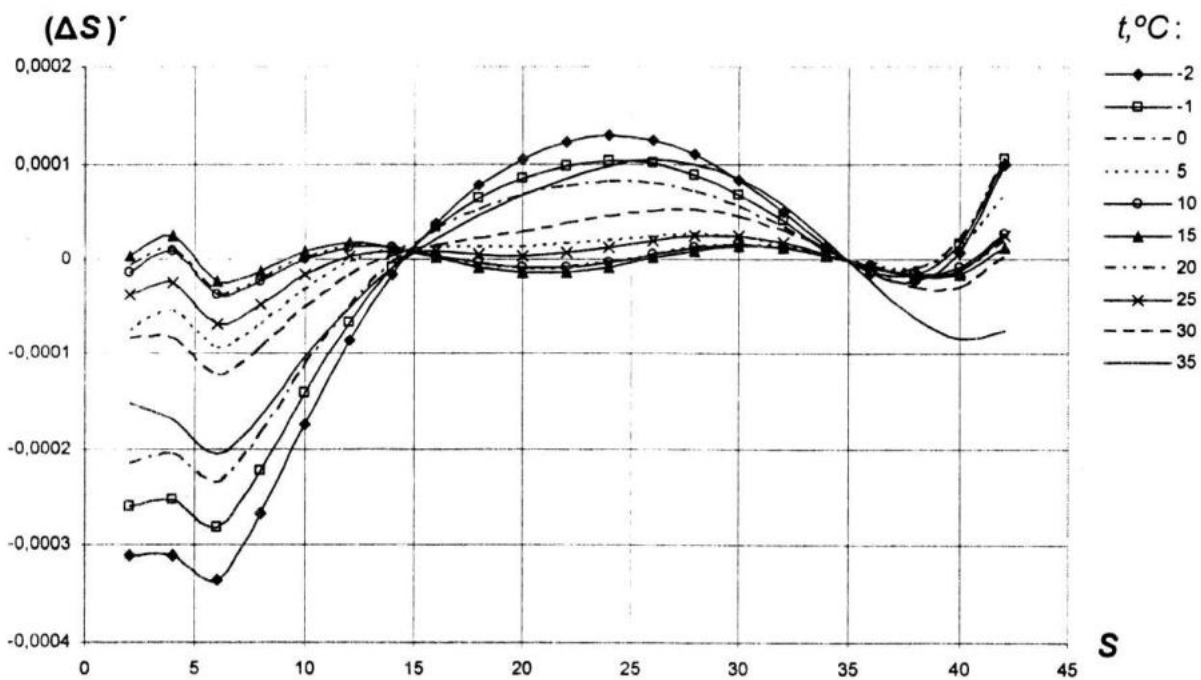


Рисунок 2 – Погрешность вычисления R_i в эквиваленте солёности $(\Delta S)'$ в диапазоне изменчивости солёности от 2 до 42 *psc* при температуре (-2 – 35) °C

Максимальная абсолютная погрешность вычисления относительной электрической проводимости R по формулам (9, 10) в диапазоне солёности (2÷42) *енс* при изменении температуры от минус 2 до 35 °С из-за погрешности вычисления R_t по формулам (6–8) не превысит в эквиваленте солёности $\pm 0,00021$ *енс*.

Заключение. В результате проведенных исследований предложена прямая формула вычисления относительной электрической проводимости R_t с погрешностью не более $\pm 0,0002$ *енс* в градуировочных баках или непосредственно в море в месте нахождения *CTD*-измерителя при калибровке измерительных каналов ОЭП.

К сожалению в недавнем издании книги [5] в разделе 2.2 для вычисления R_t приводится формула А. Пуассона [6] $R_t = R_{15} - \Delta_{15}$, в которой А. Пуассон дает зависимость

$$\Delta_{15} = f(R_t, t) = 10^{-5} \cdot R_t \cdot (R_t - 1)(t - 15) * \\ * [120,0 - t \cdot (1,96 - 0,019 \cdot t) - \\ - R_t \cdot (50,67 - 0,215 \cdot t - 17,47 \cdot R_t)],$$

а в работе [5] предлагается заменить неизвестное R_t на известное R_{15} . Такая замена приводит к погрешности вычисления Δ_{15} при температуре минус 2÷35 °С и в диапазоне изменения R_{15} от 0,07 до 1,2, достигающей минус 0,0024÷0,001 *енс* в эквиваленте солёности. Более того, использование самой формулы А. Пуассона для вычисления солёности по R_t , по нашим оценкам даёт расхождение с ШПС-1978 в эквиваленте солёности, достигающее $\pm 0,004$ *енс* в диапазонах температуры от минус 2 до 0 °С

и от 30 до 35 °С при относительной электропроводимости R_t , равной 0,15÷0,45, а также 1,15÷1,2.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.G. Perkin, E.L. Lewis. The practical Salinity Scale 1978: Fitting the date/ IEEE Journal of oceanic Engineering, Vol. OE-5, No. 1. 1980. – P. 9–16.

2. В.И. Забурдаев. Требования к средствам для воспроизведения шкалы практической солёности ШПС-1978 и соответствующей ей шкалы относительной электропроводимости. Системы контроля окружающей среды: сб. научн. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь. 1998. – С. 56–63.

3. N.P. Fofonoff, R.C. Millard Jr. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO technical papers in marine science, 44. Paris. UNESCO. 1983. – 53 p.

4. П.А. Калашников. Первичная обработка гидрологической информации. – Ленинград: Гидрометеиздат. 1985. – 152 с.

5. Океанология: средства и методы океанографических исследований / Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Ф. Агеев и др. Междунар. ассоц. акад. наук; РАН; нац. акад. наук Украины. – М. Наука, 2005. – 795 с.

6. A. Poisson. Conductivity / Salinity / Temperature Relationship of Diluted and Concentrated Standard Seawater / IEEE Journal of oceanic engineering, Vol. OE-5, No.1 1980 – P. 41–50.