

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СОЛЁНОСТИ ПРОБ МОРСКОЙ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО СОЛЕМЕРА

А.П. Алексеев, В.П. Бережной

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

В статье представлены результаты расчета неопределенности при градуировке минизонда ГАП-АК-16Р по одной пробе морской воды.

Введение. Понятие «неопределенность» [1] в измерениях, как определяемой в количественном отношении характеристики точности измерений, является относительно новым в истории измерений в противоположность терминам «погрешность» и «анализ погрешностей», которые уже давно используются в практике метрологии. В эру глобального рынка необходимо, чтобы метод оценки и выражения неопределенности был единым во всем мире так, чтобы результаты измерений, проводимых в разных странах, можно было легко сравнить. В связи с этим, в

недалеком будущем понятие «погрешность» может уйти на задний план и результаты измерений придется представлять в виде неопределенности передачи физической величины от одного средства измерительной техники к другому. В качестве примера в настоящей статье делается оценка неопределенности при измерении солёности одной пробы морской воды.

Оценка неопределенности

Описание измерения и составление модели. При градуировке датчика удельной электропроводности типа ПЭИ-106 № 02 измерительного канала относительной электрической проводимости (ОЭП) комплекса ГАП-АК-16Р были отобраны пробы морской воды. Измерение солёности проб было произведено с помощью лабораторного солемера типа СОКОЛ МГИ 4602 № 004, прошедшего метрологическую аттестацию в установленном порядке. Время измерения одной пробы с солёностью примерно 19 единиц практической солёности (е. п. с.) составляло 10 секунд.

Математическая модель измерений солёности с помощью лабораторного солемера, согласно ШПС-78, имеет следующий вид

$$f(t, R_T) = S = 0,008 - 0,1692R_T^{1/2} + 25,3851R_T + 14,0941R_T^{3/2} - 7,0261R_T^2 + 2,7081R_T^{5/2} + \frac{t-15}{1+0,0162(t-15)} (0,0005 - 0,0056R_T^{1/2} - 0,0066R_T - 0,0375R_T^{3/2} + 0,0636R_T^2 - 0,0144R_T^{5/2}) \quad (1)$$

где R_T – ОЭП морской воды при температуре t .

Результаты измерений. Результаты измерений сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты многократных измерений t и R_T пробы

№ измерения	Время измерения, с	Температура пробы t , °С	Относительная Электропроводность R_T отн. ед.	Солёность S , е. п. с.
1	1	17,9	0,5815	19,19477
2	2	18,0	0,5816	19,19781
3	3	18,0	0,5816	19,19781
4	4	18,1	0,5817	19,20085
5	5	18,0	0,5816	19,19781
6	6	18,1	0,5817	19,20085
7	7	18,0	0,5816	19,19781
8	8	18,0	0,5816	19,19781
9	9	17,9	0,5815	19,19477
10	10	18,0	0,5816	19,19781

Среднее значение. Для каждой величины t и R_T , входящих в уравнение модели (1), необходимо определить среднее значение по формуле

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2)$$

где n – число измерений величины q_k ($k=1,2,\dots,n$).

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n t_k = 18^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\bar{R}_T = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_{T_k} = 0,58158 \quad (4)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_k = 19,19781 \text{ е. п. с.} \quad (5)$$

Экспериментальная дисперсия. Экспериментальная дисперсия наблюдений оценивает дисперсию распределения вероятностей, которое в данном случае является распределением частот, лежащим в основе наблюдений

$$S^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (6)$$

и в нашем случае составляет

$$S^2(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (t_k - \bar{t})^2 = 0,00436 (\text{°C})^2 \quad (7)$$

$$S^2(R_T) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (R_{T_k} - \bar{R}_T)^2 = 49 \cdot 10^{-10} \quad (8)$$

$$S^2(S) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (S_k - \bar{S})^2 = 4,103 \cdot 10^{-6} (\text{е.п.с.})^2 \quad (9)$$

Стандартная неопределенность. Стандартная неопределенность – неопределенность результата измерений, выраженная как стандартное отклонение.

Стандартная неопределенность, связанная с оценкой q , является экспериментальным стандартным отклонением среднего значения и равна положительному квадратному корню из экспериментальной дисперсии среднего значения

$$S(\bar{q}_k) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (10)$$

и для температуры, ОЭП и солёности составляет

$$S(\bar{t}) = 0,02087^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$S(\bar{R}_T) = 0,000022 \quad (12)$$

$$S(\bar{S}) = 0,000640 \text{ е. п. с.} \quad (13)$$

Коэффициент чувствительности. Частные производные $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ называются коэффициентами чувствительности c_i . Коэффициенты чувствительности показывают, как выходная оценка f изменяется с изменением значений входных оценок x_1, x_2, \dots, x_n . Строго говоря, частные производные представляют собой

$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i}$, оцененные на математических ожиданиях величины X_i . Однако на практике частные производные оцениваются как

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_1, x_2, \dots, x_n} \quad (14)$$

и следовательно для нашего случая получается

$$c_t = \left. \frac{\partial f(t, R_T)}{\partial t} \right|_{t=18, R_T=0,58} = -0,00586 \text{ е.п.с./°C} \quad (15)$$

$$c_{R_T} = \left. \frac{\partial f(t, R_T)}{\partial R_T} \right|_{t=18, R_T=0,58} = 36,2408 \text{ е.п.с./ед} \quad (16)$$

Анализ корреляций. Две входные величины могут быть независимы или связаны между собой, то есть, взаимозависимы или коррелированы. В концепции неопределенности имеется в виду корреляция «логиче-

ская», а не математическая. Насколько эффект корреляции должен приниматься в расчет, зависит от соответствующего измерения, от знаний о методе измерения и от проведенной оценки взаимных зависимостей входных величин.

Может существовать значительная корреляция между двумя входными величинами, если при их определении используют один и тот же измерительный прибор, физический эталон или справочные данные, имеющие значительную стандартную неопределенность.

Если две входные величины X_i и X_j и их оценки x_i , x_j являются коррелированными в определенной степени, то есть они являются зависимыми друг от друга тем или иным способом, то при оценивании суммарной стандартной неопределенности среди вкладов неопределенностей входных величин должна учитываться их ковариация $u(x_i, x_j)$, в общем виде оцениваемая по следующей формуле [1]

$$u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (17)$$

где $u(x_i)$, $u(x_j)$ – стандартные неопределенности входных величин; $r(x_i, x_j)$ – коэффициент корреляции ($i \neq j$ и $|r| \leq 1$).

В случае n пар независимых повторных наблюдений двух величин P и Q ковариация оценок их средних значений \bar{p} и \bar{q} вычисляется по формуле

$$S(\bar{p}, \bar{q}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})(p_k - \bar{p}) \quad (18)$$

Оцененный коэффициент корреляции для величин P и Q получают из уравнения (18)

$$r(p, q) = \frac{S(\bar{p}, \bar{q})}{S(\bar{p})S(\bar{q})} \quad (19)$$

$$r(t, R_T) = \frac{43 \cdot 10^{-9}}{0,00208 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 0,953 \quad (20)$$

Из выражения (20) следует, что входные величины t и R_T сильно коррелированы, то есть изменение температуры пробы влечет за собой изменение относительной электропроводности.

Суммарная стандартная неопределенность. Суммарная стандартная неопределенность – стандартная неопределенность результата измерений, когда результат получают из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню из суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенных в соответствии с тем, как результат измерений изменяется в зависимости от изменения этих величин.

В случае коррелированных входных величин, суммарная стандартная неопределенность оценивается по формуле [1]

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 U^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \quad (21)$$

где c_i , c_j – коэффициенты чувствительности; $U(x_i)$, $U(x_j)$ – стандартные неопределенности входных величин.

По нашим данным оценка суммарной стандартной неопределенности измерения солености составляет

$$U_c(S) = 0,00101 \text{ е. п. с.} \quad (22)$$

Расширенная неопределенность. Расширенная неопределенность – величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием

могли бы быть приписаны измеряемой величине.

В нашем случае оценку расширенной неопределенности U получают путем умножения суммарной стандартной неопределенности выходной величины $U_c(S)$ на коэффициент охвата k

$$U = k \cdot U_c(S) \quad (23)$$

Коэффициент охвата – числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

Если известно, что распределение вероятностей выходной величины подчиняется

нормальному закону, то коэффициент охвата $k=2$. Расширенная неопределенность будет равна

$$U = 2 \cdot 0,00101 = 0,00202 \text{ е. п. с.} \quad (24)$$

Результат измерений. Оцененное действительное значение практической солености лежит в пределах

$$S = \bar{S} \pm 2 \cdot S(\bar{S}) = (19,19781 \pm 0,00128) \text{ е. п. с.} \quad (25)$$

Заключение. При оценке неопределенности солёности обрабатываемых проб морской воды, фактическая расширенная неопределенность имеет значение, равное $\pm 0,00128$ е. п. с. при коэффициенте охвата $k=2$. В то время как косвенная оценка суммарной стандартной неопределенности равна $\pm 0,00202$ е. п. с. при том же коэффициенте охвата. Это

говорит о том, что количество измерений выбрано правильно, а в результатах измерений отсутствуют промахи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Ю. Ефремова. Оценка неопределенности в измерениях: Практическое пособие. – Мн.: БелГИМ. (Серия «Руководство по применению СТБ ИСО/МЭК 17025»). 2003. – 50 с.
2. ГСССД 77 – 84 Морская вода. Шкала практической солености 1978.
3. E.G. Perkin, E.L. Lewis. The practical salinity scale: fitting the data. UNESCO technical papers in marine science № 37. Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978. UNESCO, 1981. – P.107-114.