

ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ СЕНСОРОВ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ПРИ КОСВЕННОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОЛЕННОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, Е.Н. Сычев

Вопросы измерений массы растворенных веществ или абсолютной солености в условиях среды на месте (*in situ*) автоматизированными приборами по-прежнему остаются открытыми. Способы вероятного решения этих вопросов зависят от развития новых технологий в области океанографических измерений. Соленость относится к таким параметрам морской воды, которые прямо измерить *in situ* пока невозможно. До настоящего времени все известные, существующие или перспективные, способы определения солености являются косвенными. Цель данной работы – найти максимальные коэффициенты чувствительности с целью оценки неопределенности сенсоров входных величин и сравнения различных методов косвенного определения солености.

Для решения указанной проблемы в работе используются методы прямых и обратных задач метрологии. В работе эти задачи были решены для четырех принципиально различных методов косвенного (расчетного) определения солености морской воды: 1) метода относительной электропроводности (МОЭ), 2) метода скорости звука (МСЗ), 3) метода плотности (МП) и 4) метода показателя преломления (МПП). В зависимости от условий среды найдены максимальные значения коэффициентов чувствительности (всего 13 коэффициентов) для выходной величины (солености) по всем входным параметрам каждого из методов. Посредством решения обратных задач для принятого условного базового уровня неопределенности солености и при максимальных коэффициентах чувствительности рассчитаны оценки неопределенности сенсоров входных параметров для каждого из четырех методов.

Полученные результаты позволяют оценить требуемую точность сенсоров входных величин при любом заданном уровне неопределенности выходной величины или точности выходной величины при любом заданном уровне неопределенности сенсоров входных величин. Из трех перспективных методов косвенного определения солености МПП является наилучшим кандидатом для замены МОЭ в ближайшем будущем.

Ключевые слова: морская вода, проводимость, скорость звука, плотность, показатель преломления, соленость, измерение, сенсор, океанографический зонд, косвенные измерения, неопределенность, метрология.

Введение

Соленость является одной из важнейших характеристик морской воды. В океанографических исследованиях с использованием данных о солености морской воды проводится анализ термохалинной структуры и движения морских вод, вычисляется плотность морской воды, необходимая при расчетах общей циркуляции мирового океана, обеспечивается решение климатических задач и т.д.

Следует отметить, что соленость является одним из параметров морской воды, которые прямо опре-

делить *in situ* (т.е. в условиях среды на месте) пока невозможно. Однако с каждым годом растет объем измерений, косвенно связанных с определением солености, и одновременно растут требования к точности (неопределенности) результатов таких измерений.

Традиционный наиболее точный и объективный лабораторный химический анализ морской воды с взятием проб с различных глубин является длительным, сложным, трудоемким и затратным процессом. Поэтому, в интересах ускорения, удешевления и автоматизации процесса гидрологиче-

ских измерений, которые проводятся в огромных объемах, следует рассмотреть и сравнить все существующие и принципиально возможные косвенные методы определения солености *in situ* через результаты измерений каких-либо других, функционально связанных с соленостью, физических показателей морской воды.

Среди функциональных зависимостей между несколькими параметрами морской воды с участием солености, которые либо уже используются, либо в перспективе могут быть использованы в качестве методов косвенного определения солености морской воды *in situ*, наибольший интерес для исследования представляют следующие четыре:

1) $S_p(C, T, P)$ – метод относительной электропроводности (МОЭ);

2) $c(S_A, T, P)$ – метод скорости звука (МСЗ);

3) $\rho(S_A, T, P)$ – метод плотности (МП);

4) $n(S_A, T, P, W)$ – метод показателя преломления (МПП).

Зависимость (1) существует в виде алгоритма в рамках ШПС-78 [1, 2]. Следует отметить, что зависимость (1) в рамках соответствующего метода широко используется для определения практической солености по данным измерений *CTD*-зондов.

Зависимости (2) и (3) существуют в виде алгоритмов в составе библиотеки алгоритмов Международного термодинамического уравнения состояния морской воды «TEOS-10» [2]. Измерения скорости звука или плотности потенциально являются привлекательными способами оценки абсолютной солености, поскольку и скорость звука, и плотность учитывают все массовые составляющие морской воды. В перспективе с увеличением точности измерений либо скорости звука, либо плотности в условиях *in situ* могут появиться реальные возможности использования зависимостей (2) или (3) для косвенного определения абсолютной солености морской воды.

Зависимость (4) была реализована авторами в виде интерполяционного алгоритма с использованием таблиц данных для показателя преломления [3, 4]. Интерес к зависимости (4) обосновывается тем, что показатель преломления морской воды связан с плотностью морской воды, которая, в свою очередь, связана с абсолютной соленостью морской воды.

Зависимость (1) является явной относительно практической солености, а зависимости (2), (3) и (4), неявные относительно абсолютной солености, преобразуются в явные посредством математического обращения. В итоге в качестве вычислительных алгоритмов при анализе четырех указанных методов косвенного определения солености *in situ* будем использовать следующие алгоритмы:

$$S_p = S_p(C, T, P), \quad (1)$$

$$S_A = S_A(c, T, P), \quad (2)$$

$$S_A = S_A(\rho, T, P), \quad (3)$$

$$S_A = S_A(n, T, P, W), \quad (4)$$

где S_p – практическая соленость; S_A – абсолютная соленость; C – электропроводность; T – температура; P – гидростатическое давление; c – скорость звука; ρ – плотность; W – длина волны используемого источника света.

Все свойства морской воды относятся к условиям *in situ*. Уравнения (1)–(4) имеют 13 входных величин в четырех группах: 1) (C, T, P) ; 2) (c, T, P) ; 3) (ρ, T, P) ; 4) (n, T, P, W) .

Для определения потенциальной возможности использования того или иного метода косвенных измерений необходимо найти коэффициенты чувствительности, которые позволят рассчитать степень распространения (передачи) неопределенности от входных физических величин к выходным через их функциональную зависимость посредством решения прямых задач и от выходных к входным посредством решения обратных задач.

Следует отметить, что для солености, как косвенно определяемой выходной величины, расчеты неопределенности первичных измерителей входных физических величин, исходя из заданной неопределенности солености, до сих пор не проводились [5]. Обычно метрологи ограничиваются решением прямых задач, когда по неопределенностям входных величин рассчитывается суммарная (комплексная) неопределенность выходной величины [6].

Целями данной работы являются определения:

– максимальных коэффициентов чувствительности входной величины по каждой из входных величин, которые могут быть использованы для решения прямых и обратных задач метрологии при любом требуемом уровне неопределенности входных величин или солености;

– оценок необходимой точности (неопределенности) сенсоров входных параметров в качестве исходных требований к измерительным каналам при заданном уровне неопределенности солености.

1. Метод относительной электропроводности (МОЭ)

В океанографии для учета солености морской воды широко используется «практическая соленость» (S_p). Практическая соленость (S_p) является безразмерной относительной величиной и определя-

ется косвенным путем через измерения отношения проводимостей (электропроводностей) $C(S_p, T, P)/C(35, T, 0)$ морской воды и раствора KCl стандартного состава [1, 2]. Этот метод позволил увеличить точность и автоматизировать процесс измерения относительной электропроводности. Вплоть до настоящего времени практическая соленость морской воды является величиной, которая накапливается в национальных и международных базах данных. Для измерений электропроводности морской воды широко используются CTD-зонды.

При использовании алгоритма (уравнения) (1) комбинированная (суммарная) неопределенность $u_{\Sigma}(S_p)$ результатов измерений практической солености согласно международной методике [7] может быть выражена следующим образом:

$$u_{\Sigma}(S_p) = \sqrt{\left[\frac{\partial S_p}{\partial C} u(C)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_p}{\partial T} u(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_p}{\partial P} u(P)\right]^2} = \sqrt{[k_C(S_p) \cdot u(C)]^2 + [k_T(S_p) \cdot u(T)]^2 + [k_P(S_p) \cdot u(P)]^2} = \sqrt{[u_C(S_p)]^2 + [u_T(S_p)]^2 + [u_P(S_p)]^2}, \quad (5)$$

где $u(C)$, $u(T)$, $u(P)$ – неопределенности измерения входных величин – проводимости, температуры и гидростатического давления;

$k_C(S_p)$, $k_T(S_p)$, $k_P(S_p)$ – коэффициенты чувствительности для выходной величины (S_p) по каждой из входных величин (C , T , P);

$u_C(S_p)$, $u_T(S_p)$, $u_P(S_p)$ – составляющие суммарной неопределенности $u_{\Sigma}(S_p)$, по числу входных величин.

Для решения прямых и обратных метрологических задач МОЭ используем уравнения, которые связывают между собой неопределенности входных и выходных величин (табл. 1).

Таблица 1. Уравнения для решения метрологических задач МОЭ

Прямые задачи	Обратные задачи
(1.1) $u_C(S_p) = k_C(S_p) \cdot u(C)$	(1.4) $u(C) = u_C(S_p) / k_C(S_p)$
(1.2) $u_T(S_p) = k_T(S_p) \cdot u(T)$	(1.5) $u(T) = u_T(S_p) / k_T(S_p)$
(1.3) $u_P(S_p) = k_P(S_p) \cdot u(P)$	(1.6) $u(P) = u_P(S_p) / k_P(S_p)$

Из уравнений прямых задач следует, что при прочих равных условиях, чем больше величина коэффициента чувствительности, тем в большей степени неопределенность соответствующего входного параметра распространяется на выходную величину через взаимную функциональную зависимость.

Графики уравнений прямых задач имеют вид прямых линий (исходящих из начала координат), танген-

сы углов наклона которых численно равны коэффициентам чувствительности (k_i) при условиях среды (P , T , S_p). При этом неопределенности $u(C)$, $u(T)$, $u(P)$ принимаются равными неопределенностям соответствующих сенсоров для измерения входных величин.

Графики уравнений обратных задач строят аналогичным образом, поменяв местами оси координат. Тангенсы углов наклона графиков в этом случае будут численно равны обратным коэффициентам чувствительности ($1/k_i$). При этом составляющие суммарной неопределенности вычисляются исходя из заданной величины суммарной неопределенности с использованием некоторого принятого реалистичного условия распределения суммарной неопределенности между составляющими.

В 1991 г. документами WHPО – «Офис гидрографической программы WOCE» (World Ocean Circulation Experiment) были установлены требования к точности океанографических измерений практической солености в размере 0,002 [5] относительно Международной шкалы практической солености от 1978 г. (ШПС-78) [1, 2]. На языке современной терминологии это означает, что требуемые уровни суммарной неопределенности косвенных измерений практической и абсолютной солености не должны превосходить $u_{\Sigma}(S_p) = 0,002$ ЕПС и $u_{\Sigma}(S_A) = 0,002$ ‰/кг соответственно. Эти значения приняты в данной работе в качестве условного базового уровня для сравнения между собой различных методов косвенного определения солености.

Здесь и далее для распределения суммарной неопределенности между составляющими будем использовать условие равенства вкладов всех составляющих. Тогда для условной базовой величины суммарной неопределенности $u_{\Sigma}(S_p) = 0,002$ получим следующее значение для каждой из трех составляющих суммарной неопределенности:

$$u_C(S_p) = u_T(S_p) = u_P(S_p) = \sqrt{[u_{\Sigma}(S_p)]^2 / 3} = \sqrt{(0,002)^2 / 3} = 0,0011547. \quad (6)$$

Для распространения результатов решения указанных задач на весь диапазон изменения входных величин будем использовать наибольшие (максимальные) значения коэффициентов чувствительности для каждой из входных величин.

Путем вариативных расчетов применительно к широкому диапазонам изменения входных величин ($P = 0-100$ МПа, $T = 0-30$ °С, $S_p = 0-42$) определены следующие максимальные значения коэффициентов чувствительности:

$$k_C(S_p) = 1,367, 1/(мС/см);$$

$$k_T(S_p) = 1,378, 1/(\text{°C}); k_p(S_p) = 0,000725, 1/\text{дбар}. \quad (7)$$

На рис. 1 показаны графики уравнения прямой задачи (1.1) для МОЭ при различных условиях среды (P, T, S_p) и результаты решения обратной метрологической задачи (1.4) (пунктир) при условиях (6) и (7). Из рис.1 следует, что коэффициент чувствительности $k_C(S_p)$ весьма существенно зависит от изменения температуры.

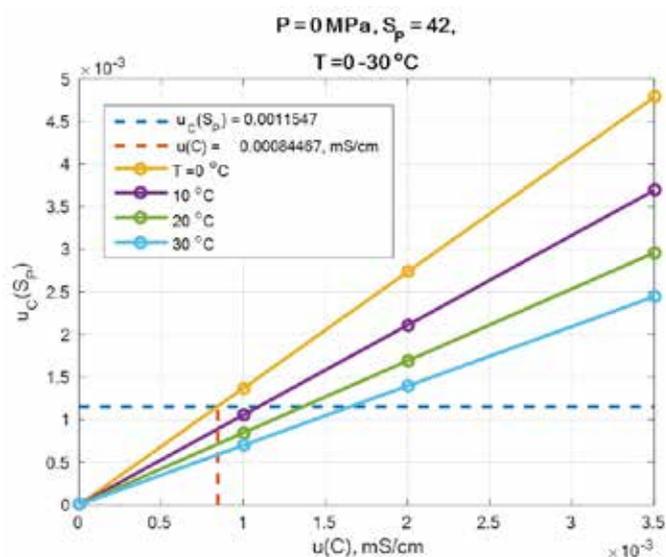


Рис. 1. Графики уравнения прямой задачи (1.1) в зависимости от температуры

Для сравнения в качестве источника данных по неопределенности реально используемых на практике сенсоров входных параметров в табл. 2 приведена классификация коммерческих океанологических приборов по точности установленных на них сенсоров [8] и результаты решения прямой задачи с целью расчета неопределенности практической солености для различных классов океанологических приборов [6]. Из табл. 2 следует, что уровень расчетной неопределенности практической солености [6] для всех классов коммерческих приборов превышает уровень, заявленный ВНРО [5]. Лучшими в табл. 2 являются сенсоры с минимальными показателями не-

Таблица 2. Классификация приборов [8] и неопределенность практической солености [6]

Класс	Неопределенность сенсоров [8]			Расчет [6]
	электропроводность	температура	давление	
	$u(C)$, мС/см	$u(T)$, °C	$u(P)$, дбар	$u_x(S_p)$
ВОСЕ класс	0,001–0,003	0,002	3	0,003–0,005
Высший (1)	0,002–0,003	0,002–0,005	0,42–1,5	0,004–0,008
Средний (2)	0,005–0,01	0,005–0,01	1-2	0,010–0,019
Миним. (3)	0,01–0,04	0,01–0,05	1–3	0,019–0,087

определенности измерений: 0,001 мС/см, 0,002 °C и 0,42 дбар по проводимости, температуре и давлению соответственно.

Из рис. 1 также следует, что при изменениях температуры среды в пределах от 0 до 30 °C коэффициенты чувствительности изменяются в 1,5–2 раза. Это приводит к тому, что при неизменной точности (неопределенности) используемых сенсоров точность косвенных измерений практической солености может существенно изменяться в зависимости от изменения параметров состояния среды, температуры в данном случае. В табл. 3 показан пример расчета величины суммарной неопределенности косвенных измерений практической солености для крайних температур 0 и 30 °C при использовании сенсоров с лучшими характеристиками (см. табл. 2). Из табл. 3 следует, что с изменением температуры среды от 30 до 0 °C, даже при использовании одних и тех же сенсоров, суммарная неопределенность косвенных измерений практической солености изменяется по величине более, чем на 50 %, или примерно в 1,5 раза.

Таблица 3. Оценки суммарной неопределенности SP при T = 0 и 30 °C

Показатель I	$k_{imin} \times u_i$	$k_{imax} \times u_i$
	Расчет, T= 30 °C	Расчет, T= 0 °C
$u_C(S_p) = k_C(S_p) \times u(C)$	0,698×0,001	1,367×0,001
$\Pi u_T(S_p) = k_T(S_p) \times u(T)$	0,873×0,002	1,378×0,002
$u_P(S_p) = k_P(S_p) \times u(P)$	0,000335×0,42	0,000725×0,42
$u_\Sigma(S_p), - (5)$	0,002	0,0031

В табл. 4 показаны относительные (в процентах от соответствующих максимальных значений) пределы изменения коэффициентов чувствительности для практической солености при изменении условий среды (давления, температуры и солености).

Как следует из табл. 4, коэффициенты чувствительности могут значительно изменяться в зависимости от изменений условий среды, что может привести к существенным вариациям суммарной неопределенности выходной величины. Поэтому при анализе требований к неопределенности сенсоров для косвенных измерений здесь и далее будем использовать в качестве предельно допустимых такие неопределенности входных параметров, которые рассчитываются по максимальным (предельным) значениям коэффициентов чувствительности. Следует также отметить, что всегда необходимо учитывать вклады в суммарную неопределенность от неопределен-

Таблица 4. Пределы изменения коэффициентов чувствительности для S_p в МОЭ

$\delta k_i = (k_{i \max} - k_{i \min})/k_{i \max} \cdot 100$,	$P = 0-100$ МПа, $T = 0$ °C, $S_p = 42$	$T = 0-30$ °C, $P = 0$ МПа, $S_p = 42$	$S_p = 0-42$, $P = 0$ МПа, $T = 0$ °C
$\delta k_c(S_p)$, %	7,3	48,9	23,8
$\delta k_t(S_p)$, %	7,6	36,6	95,2
$\delta k_p(S_p)$, %	61,1	53,7	94,1

ности измерения каждого из входных параметров без исключения.

Для условия (6) и с использованием максимальных коэффициентов чувствительности (7) посредством решения обратных метрологических задач МОЭ были найдены предельные значения неопределенностей теоретических сенсоров входных величин (U_0) (табл. 5). При этом оказалось, что точность теоретического сенсора давления даже хуже, чем у реального сенсора. Поэтому была сделана замена теоретического сенсора давления с неопределенностью 1,59 дбар на сенсор с лучшей реальной характеристикой 0,42 дбар, а значения двух других сенсоров пересчитаны с учетом видоизмененного условия (6). В результате получены новые значения теоретических сенсоров (U_1), но суммарная неопределенность солености осталась при этом неизменной. Значения неопределенностей теоретических сенсоров (U_1) сравниваются с характеристиками реальных (U_2) [8] сенсоров входных величин.

Показанные в табл. 5 предельные минимальные значения неопределенностей входных параметров (U_1) могут служить ориентиром при подборе сенсоров для косвенных измерений практической солености с уровнем точности не хуже, чем 0,002.

Из табл. 5 следует, что при использовании лучших коммерческих сенсоров входных величин согласно табл. 3 суммарная неопределенность косвенных измерений практической солености составляет 0,003–0,008, что превышает условный базовый уро-

вень 0,002 в 1,6–4,2 раза. Для достижения уровня неопределенности практической солености в 0,002 достаточно снизить неопределенность сенсора температуры примерно в 2 раза, оставив неопределенности коммерческих сенсоров проводимости и давления [8] без изменения.

Метод относительной электропроводности, обладающий высокой чувствительностью, удобный для автоматизации и обеспеченный коммерческими сенсорами приемлемой точности нашел широкое применение для косвенных измерений практической солености морской воды *in situ*.

Однако этот метод имеет существенные и, строго говоря, неустранимые недостатки. Во-первых, он основывается на достаточно условном принципе постоянства солевого состава морской воды, который нарушается в окраинных морях, аномальных зонах океанов и др. Во-вторых, существует серьезная метрологическая проблема сопоставимости результатов определения солености в течение длительного времени, которая заключается в том, что стабильность химического состава стандартной морской воды не может быть обеспечена, поскольку эта вода имеет естественное происхождение. И, в-третьих, на измеряемую через относительную электропроводность так называемую «практическую соленость» влияет не вся, а только ионная составляющая действительной солености морской воды (т.е. только растворы электролитов в морской воде). Однако полная (абсолютная) соленость является общей массовой долей всех, в том числе и непроявляющихся, растворенных в морской воде веществ, следствием чего могут быть существенные аномалии солености. Кроме того, применимость метода определения практической солености *in situ* через относительную электропроводность ограничена диапазоном соленостей от 2 до 42 ЕПС.

Для улучшения сложившегося положения к 2010 г. было разработано и принято международное уравнение состояния морской воды «TEOS-10» [2], в котором наряду с температурой и гидростатическим давлением в качестве третьего независимого параметра вместо безразмерной практической солености был введен новый показатель солености – «абсолютная соленость» – S_A . Согласно

Таблица 5. Оценки суммарной неопределенности практической солености для теоретических (U_0 , U_1) и реальных (U_2) сенсоров входных величин для МОЭ

Показатель	k_p max	u_p min (U_0)	u_p min (U_1)	u_p (U_2)	$(U_2) / (U_1)$
	Расчет	Расчет	Расчет	[8]	
$k_c(S_p)$, 1/(мС/см)	1,367	–	–	–	–
$u(C)$, мС/см	–	0,000845	0,001	0,001–0,003	1–3
$k_t(S_p)$, 1/(°C)	1,378	–	–	–	–
$u(T)$, °C	–	0,00084	0,001	0,002–0,005	2–5
$k_p(S_p)$, 1/дбар	0,000725	–	–	–	–
$u(P)$, дбар	–	1,59	0,42	0,42–3	1–7
$u_\Sigma(S_p)$, – (5)	–	0,002	0,002	0,003–0,008	1,55–4,15

TEOS-10, «абсолютная соленость» – это массовая доля всех материалов, растворенных в морской воде, она является размерной величиной, измеряется в «г/кг» и согласуется с системой измерений *SI*.

Предпочтительность размерной абсолютной солености по сравнению с практической соленостью заключается в том, что термодинамические свойства водных солевых растворов различного типа, в том числе и морской воды, зависят от массы растворенных солей. Благодаря этому уравнение TEOS-10, созданное под абсолютную соленость, может быть распространено также и на такие водные солевые растворы, для которых нарушается закон о постоянстве солевого состава.

Связь между абсолютной соленостью и практической соленостью морской воды устанавливается следующим соотношением:

$$S_A = S_R + \delta S_A = (35,16504 / 35)S_p + \delta S_A, \text{ г/кг.} \quad (8)$$

Здесь S_R , г/кг – стандартная соленость (соленость стандартной морской воды), г/кг; S_p – практическая соленость; δS_A – аномалия абсолютной солености, г/кг. Аномалия абсолютной солености может достигать максимальных значений от 0,03 г/кг в открытом океане до 0,3 г/кг в некоторых прибрежных районах [5, 9]. Стандартная неопределенность абсолютной солености $u(S_A)$ без учета аномалии абсолютной солености может быть связана с неопределенностью практической солености соотношением $u(S_A) = (35,16504/35)u(S_p) = 1,0047154 u(S_p) \approx u(S_p)$, г/кг.

Если данные об аномалии абсолютной солености отсутствуют, то принимается $S_A = S_R$. На практике вероятны ситуации, когда метод относительной электропроводности без учета аномалии абсолютной солености может привести к существенному увеличению неопределенности результатов определения солености, например, от уровня 0,003 г/кг в десятки раз (от 10 до 100 раз).

В силу указанных причин актуальной является задача по созданию и/или развитию иных методов прямого или косвенного определения абсолютной, связанной с плотностью, солености морской воды в полном, реальном для окружающей среды, диапазоне соленостей, температур и давлений. Такие параметры морской воды, которые связаны с ее средней плотностью, существуют, к ним, в частности, относятся скорость звука, сама плотность и показатель преломления. Далее рассмотрим потенциальные возможности использования методов скорости звука, плотности и показателя преломления для определения полной (абсолютной) солености морской воды.

2. Метод скорости звука (МСЗ)

Интерес к применению метода скорости звука для определения солености вызван тем, что в мире накоплен значительный опыт по выпуску и использованию высокоточных акустических приборов *SVP*-зондов (профилографов) для проведения автоматизированных измерений скорости звука *in situ*. При этом достигнуты следующие показатели точности (неопределенности) сенсоров скорости звука: 0,020 м/с – для сенсоров-измерителей скорости звука [10]; 0,017 м/с - теоретическая погрешность измерения для измерителей скорости звука производителя «Valeport» [5], 0,015 м/с – для лабораторных измерений [11]. Более того, как показано в нашей работе [12], с использованием уравнения (2) и *CTD*-зондов высших классов точности возможно выполнение косвенных измерений скорости звука *in situ* с точностью (неопределенностью) порядка 0,010–0,013 м/с, что даже несколько лучше, чем результаты лабораторных измерений [11].

Используя уравнение (2), в соответствии с методикой [7] получим выражения суммарной неопределенности абсолютной солености $u_\Sigma(S_A)$:

$$\begin{aligned} u_\Sigma(S_A) &= \sqrt{\left[\frac{\partial S_A}{\partial c} u(c) \right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial T} u(T) \right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial P} u(P) \right]^2} = \\ &= [k_c(S_A) \cdot u(c)]^2 + [k_T(S_A) \cdot u(T)]^2 + [k_P(S_A) \cdot u(P)]^2 = \\ &= [u_c(S_A)]^2 + [u_T(S_A)]^2 + [u_P(S_A)]^2 \quad (9) \end{aligned}$$

Здесь $u(c)$, $u(T)$, $u(P)$ – неопределенности измерения входных величин – скорости звука, температуры и гидростатического давления соответственно; $k_c(S_A)$, $k_T(S_A)$, $k_P(S_A)$ – коэффициенты чувствительности для выходной величины (S_A) отдельно по каждой из трех входных величин; $u_c(S_A)$, $u_T(S_A)$, $u_P(S_A)$ – соответствующие составляющие суммарной неопределенности абсолютной солености $u_\Sigma(S_A)$.

Для решения прямых и обратных задач используем уравнения, которые связывают между собой неопределенности входных и выходных величин для МСЗ (табл. 6).

Таблица 6. Уравнения для решения метрологических задач МСЗ

Прямые задачи	Обратные задачи
(2.1) $u_c(S_A) = k_c(S_A) \cdot u(c)$	(2.4) $u(c) = u_c(S_A) / k_c(S_A)$
(2.2) $u_T(S_A) = k_T(S_A) \cdot u(T)$	(2.5) $u(T) = u_T(S_A) / k_T(S_A)$
(2.3) $u_P(S_A) = k_P(S_A) \cdot u(P)$	(2.6) $u(P) = u_P(S_A) / k_P(S_A)$

Из условия равенства вкладов всех составляющих для условной величины суммарной неопределенности абсолютной солености = 0,002 г/кг получим следующее значение неопределенности для каждой из трех составляющих суммарной неопределенности:

$$u_c(S_A) = u_T(S_A) = u_P(S_A) = \sqrt{[u_\Sigma(S_A)]^2 / 3} = \sqrt{(0,002)^2 / 3} = 0,0011547, \text{ г/кг.} \quad (10)$$

Путем вариативных расчетов применительно к широкому диапазонам изменения входных величин (P = 0–100 МПа, T = 0–30 °C, S_A = 0–42 г/кг) определены следующие максимальные значения коэффициентов чувствительности:

$$k_c(S_A) = 1,745 \text{ (г/кг)/(м/с); } k_T(S_A) = 4,066 \text{ (г/кг)/(°C); } k_P(S_A) = 0,0286 \text{ (г/кг)/дбар.} \quad (11)$$

На рис. 2 показаны графики уравнения прямой задачи (2.1) для МСЗ при различных условиях среды (P, T, S_A) и результаты решения обратной метрологической задачи (2.4) (пунктир) при условиях (10) и (11). Из рис. 2 следует, что коэффициент чувствительности k_c(S_A) значительно зависит от изменения солености.

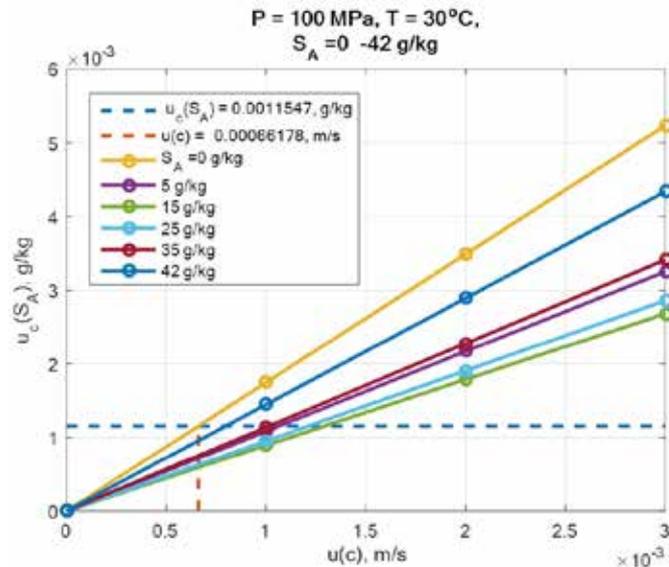


Рис. 2. Графики уравнения прямой задачи (2.1) в зависимости от солености

В табл. 7 показаны относительные (в процентах от соответствующих максимальных значений) пределы изменения коэффициентов чувствительности для абсолютной солености при изменении условий среды (давления, температуры и солености). Из табл. 7 следует, что изменчивость коэффициентов чувствительности в

Таблица 7. Пределы изменения коэффициентов чувствительности для S_A в МСЗ

$\delta k_i = (k_{i \max} - k_{i \min}) / k_{i \max} \cdot 100, \%$	P = 0–100 МПа, T = 30 °C, S _A = 20 г/кг	T = 0–30 °C, P = 100 МПа, S _A = 20 г/кг	S _p = 0–42 г/кг, P = 100 МПа, T = 30 °C
$\delta k_c(S_A), \%$	7,2	22,5	48,8
$\delta k_T(S_A), \%$	5,8	29,9	48,8
$\delta k_P(S_A), \%$	8,4	14,7	48,9

МСЗ также может привести к значимым вариациям суммарной неопределенности выходной величины.

Путем решения обратных метрологических задач (табл.6) при условии (10) с использованием максимальных коэффициентов чувствительности (11) в работе найдены предельные расчетные значения неопределенностей теоретических сенсоров входных величин для МСЗ. В табл. 8 приведены значения неопределенностей теоретических (U1) и реальных (U2) [8, 11, 12] сенсоров входных величин, а также результаты расчета оценок суммарной неопределенности абсолютной солености как для теоретических, так и для реальных сенсоров входных величин для МСЗ.

Из табл. 8 следует, что для определения абсолютной солености методом скорости звука с неопределенностью 0,002 г/кг необходимо иметь на практике сенсоры скорости звука, температуры и давления с точностью порядка 0,0007 м/с; 0,0003 °C и 0,04 дбар соответственно. Однако точность даже лучших на сегодня сенсоров недостаточна и существенно ниже расчетных (табл. 9) уровней: в 23 раза для скорости звука; в 7 раз для температуры и в 11 раз для давления. При точности существующих сенсоров точность результатов косвенного определения абсолютной солености методом скорости звука в 15–48 раз хуже необходимой.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что метод скорости звука не следует рассматривать в качестве метода для точного косвенного определения абсолютной солености *in situ* до тех

Таблица 8. Оценки суммарной неопределенности S_A для теоретических (U1) и реальных (U2) сенсоров в МСЗ

Показатель	k _p max	u _p min (U1)	u _p (U2)	(U2 / U1)
	Расчет	Расчет	[8, 11, 12]	
k _c (S _A), (г/кг)/(м/с)	1,745	–	–	–
u(c), м/с	–	0,000662	0,015–0,02	22,7–30,2
k _T (S _A), (г/кг)/(°C)	4,066	–	–	–
u(T), °C	–	0,000284	0,002–0,005	7–17,6
k _P (S _A), (г/кг)/дбар	0,0286	–	–	–
u(P), дбар	–	0,0404	0,42–3	10,4–74,3
u _Σ (S _A), г/кг (9)	–	0,002	0,030–0,095	15–47,5

пор, пока не будут созданы сенсоры, превосходящие по точности современный уровень в 10–20 раз.

3. Метод плотности

Абсолютная соленость связана с плотностью морской воды через термодинамическое уравнение состояния TEOS-10 (3) [2].

Плотность является одним из важнейших термодинамических свойств морской воды. Однако несмотря на значимость точных данных о плотности морской воды для решения различных океанографических и климатических задач до сих пор не создано морских приборов для прямого измерения плотности морской воды в условиях *in situ*. Пока проведение прямых измерений плотности возможно лишь в лабораторных условиях на специальных исследовательских установках. Тем не менее само существование уравнения состояния (3) позволяет рассмотреть потенциальную возможность использования метода плотности для выполнения косвенных измерений абсолютной солености в условиях *in situ*.

Требования, предъявляемые к точности определения используемых значений плотности, являются весьма высокими. Считается, что для корректного решения океанографических задач неопределенность плотности должна составлять порядка двух частей на миллион [13, 14]. В абсолютном исчислении это соответствует величине неопределенности порядка 0,002 кг/м³ или 2 г/м³. В работе [15] при измерениях плотности в лабораторных условиях на вибрационном трубчатом плотномере «Anton-Paar 500» достигнутая погрешность измерений плотности составила 0,003 кг/м³. Однако в настоящее время в массовых исследованиях плотность морской воды определяется (измеряется) в основном косвенным методом путем расчета по принятому уравнению состояния морской воды [2] с использованием данных измерений солености (проводимости), температуры и гидростатического давления при CTD-зондированиях.

Результаты оценивания комбинированной (суммарной) неопределенности косвенных измерений плотности по данным CTD-зондирования приборами различных классов точности (согласно табл. 2) изложены в нашей работе [16]. В табл. 9 приведены итоговые оценки суммарной неопределенности $u_{\Sigma}(\rho)$ косвенных измерений плотности.

Из табл. 9, в частности, следует, что точности любого из четырех классов океанографических приборов (табл. 2) недостаточно, чтобы обеспечить точность (неопределенность) косвенных измерений плотности на уровне 2 г/м³. Из табл. 9 также следует, что для точных классов приборов «WOCE» и «Высший» основной причиной, снижающей точность косвенных измерений плотности, является недостаточная точность определения солености и давления. Для всех классов приборов наименьший вклад в суммарную неопределенность дает неопределенность измерений температуры, очевидно, в силу относительно более высокой точности измерений температуры по сравнению с двумя другими параметрами.

Используя уравнение (3), в соответствии с методикой [7] получим выражения суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A)$:

$$u_{\Sigma}(S_A) = \sqrt{\left[\frac{\partial S_A}{\partial \rho} u(\rho)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial T} u(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial P} u(P)\right]^2} = \sqrt{[k_{\rho}(S_A) \cdot u(\rho)]^2 + [k_T(S_A) \cdot u(T)]^2 + [k_P(S_A) \cdot u(P)]^2} = \sqrt{[u_{\rho}(S_A)]^2 + [u_T(S_A)]^2 + [u_P(S_A)]^2}. \quad (12)$$

Здесь $u(\rho)$, $u(T)$, $u(P)$ – неопределенности измерения входных величин – плотности температуры и гидростатического давления соответственно; $k_{\rho}(S_A)$, $k_T(S_A)$, $k_P(S_A)$ – коэффициенты чувствительности для выходной величины (S_A) отдельно по каждой из трех входных величин; $u_{\rho}(S_A)$, $u_T(S_A)$, $u_P(S_A)$ – соответствующие составляющие суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A)$.

Для решения прямых и обратных задач используем уравнения, которые связывают между собой нео-

Таблица 9. Пределы оценок составляющих и суммарной неопределенности плотности [16]

Класс	Пределы оценок неопределенности, г/м ³				P (max) дбар
	$u_{SA}(\rho)$	$u_T(\rho)$	$u_P(\rho)$	$u_{\Sigma}(\rho)$	
WOCE класс	1,54–3,85	0,88	13,30	13,40–13,85	6000
Высший (1)	3,17–6,33	0,85–2,13	1,99–7,12	3,74–9,53	3000
Средний (2)	8,00–15,21	2,11–4,22	4,86–9,71	9,36–18,04	2000
Миним. (3)	15,39–70,46	4,18–20,90	4,97–14,91	16,17–72,04	1000

Таблица 10. Уравнения для решения метрологических задач МП

Прямые задачи	Обратные задачи
(3.1) $u_{\rho}(S_A) = k_{\rho}(S_A) \cdot u(\rho)$	(3.4) $u(\rho) = u_{\rho}(S_A) / k_{\rho}(S_A)$
(3.2) $u_T(S_A) = k_T(S_A) \cdot u(T)$	(3.5) $u(T) = u_T(S_A) / k_T(S_A)$
(3.3) $u_P(S_A) = k_P(S_A) \cdot u(P)$	(3.6) $u(P) = u_P(S_A) / k_P(S_A)$

пределенности входных и выходных величин для МП (табл. 10).

Из условия равенства вкладов всех составляющих для заданной величины суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A) = 0,002$ г/кг получим следующее значение неопределенности для каждой из трех составляющих суммарной неопределенности:

$$u_{\rho}(S_A) = u_T(S_A) = u_P(S_A) = \sqrt{[u_{\Sigma}(S_A)]^2 / 3} = \sqrt{(0,002)^2 / 3} = 0,001154 \text{ г/кг.} \quad (13)$$

Путем вариативных расчетов применительно к широкому диапазонам изменения входных величин ($P = 0-100$ МПа, $T = 0-30$ °С, $S_A = 0-42$ г/кг) определены следующие максимальные значения коэффициентов чувствительности:

$$k_{\rho}(S_A) = 1,444, \text{ (г/кг)/(кг/м}^3\text{); } k_T(S_A) = 0,583, \text{ (г/кг)/(}^{\circ}\text{С); } k_P(S_A) = 0,00625 \text{ (г/кг)/дбар.} \quad (14)$$

На рис. 3 показаны графики уравнения прямой задачи (3.1) для МП при различных условиях среды (P, T, S_A) и результаты решения обратной метрологической задачи (3.4) (пунктир) при условиях (13) и (14). Из рис. 3 следует, что коэффициент чувствительности $k_{\rho}(S_A)$ очень слабо зависит от изменения солености.

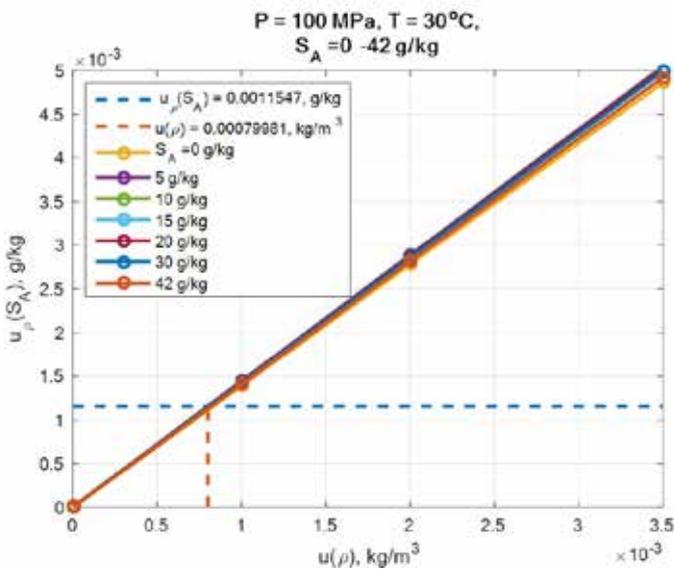


Рис. 3. Графики уравнения прямой задачи (3.1) в зависимости от солености

В табл. 11 приведены относительные пределы изменения коэффициентов чувствительности для абсолютной солености в методе плотности при изменении условий среды по давлению, температуре и солености. Из табл. 11 следует, что коэффициенты чувствительности для солености, рассчитанные по

Таблица 11. Пределы изменения коэффициентов чувствительности для МП

$\delta k_i = (k_{i \max} - k_{i \min}) / k_{i \max} \cdot 100, \%$	$P = 0-100$ МПа, $T = 30$ °С, $S_A = 5$ г/кг	$T = 0-30$ °С, $P = 0$ МПа, $S_A = 5$ г/кг	$S_p = 0-42$ г/кг, $P = 0$ МПа, $T = 30$ °С
$\delta k_{\rho}(S_A), \%$	6,2	4,4	3,8
$\delta k_T(S_A), \%$	23,7	32,4	7,9
$\delta k_P(S_A), \%$	12,3	4,2	5,5

уравнению (3), изменяются значительно меньше по сравнению с изменениями коэффициентов чувствительности в двух вышеизложенных методах.

Путем решения обратных метрологических задач (табл. 10) при условии (13) с использованием максимальных коэффициентов чувствительности (14) в работе найдены предельные расчетные значения неопределенностей теоретических сенсоров входных величин для МП. В табл. 12 приведены значения неопределенностей теоретических ($U1$) и реальных ($U2$) [8, 15] сенсоров входных величин, а также результаты расчета оценок суммарной неопределенности абсолютной солености как для теоретических, так и для реальных сенсоров входных величин для МП.

Из табл. 12 следует, что для достижения косвенных измерений абсолютной солености методом плотности с неопределенностью 0,002 г/кг необходимо создать доступные коммерческие сенсоры плотности, температуры и давления с неопределенностью порядка 0,001 кг/м³; 0,002 °С и 0,18 дбар соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по своей чувствительности метод плотности су-

Таблица 12. Оценки суммарной неопределенности S_A для теоретических ($U1$) и реальных ($U2$) сенсоров для МП

Показатель	k_{ρ}, \max	$u_{\rho}, \min (U1)$	$u_{\rho} (U2)$	$(U2 / U1)$
	Расчет	Расчет	[8,15]	
$k_{\rho}(S_A), \text{ (г/кг)/(кг/м}^3\text{)}$	1,444	–	–	–
$u(\rho), \text{ кг/м}^3$	–	0,0008	0,003–0,005	3,75–6,25
$k_T(S_A), \text{ (г/кг)/(}^{\circ}\text{С)}$	0,583	–	–	–
$u(T), \text{ }^{\circ}\text{С}$	–	0,00198	0,002–0,005	1,01–2,53
$k_P(S_A), \text{ (г/кг)/дбар}$	0,00625	–	–	–
$u(P), \text{ дбар}$	–	0,1848	0,42–3	2,27–16,23
$u_{\Sigma}(S_A), \text{ г/кг, (12)}$	–	0,002	0,0052–0,0203	2,6–10,15

щественно превосходит метод скорости звука, однако аппаратная реализация метода плотности требует разработки новых измерительных каналов с компактными коммерческими сенсорами для измерения плотности морской воды в условиях *in situ* с неопределенностью измерений порядка 0,001 кг/м³.

4. Метод показателя преломления

Метод показателя преломления морской воды потенциально является хорошим кандидатом на роль метода для определения абсолютной солености [5]. Показатель преломления морской воды, как и скорость звука, связан с плотностью морской воды, где учитывается масса всех растворенных веществ и тем самым исключается проблема с аномалией солености, которая возникает при использовании метода относительной электропроводности. Показатель преломления зависит от тех же параметров морской воды, что и плотность, а именно от абсолютной солености, температуры и давления. Кроме того, показатель преломления зависит от длины волны источника света, которая, не являясь параметром морской воды, тем не менее влияет на процесс распространения света и, следовательно, на значение показателя преломления.

Используя уравнение (4), в соответствии с методикой [7] получим выражение суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A)$:

$$u_{\Sigma}(S_A) = \sqrt{\left[\frac{\partial S_A}{\partial n} u(n)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial T} u(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial P} u(P)\right]^2 + \left[\frac{\partial S_A}{\partial W} u(W)\right]^2} = \sqrt{[k_n(S_A) \cdot u(n)]^2 + [k_T(S_A) \cdot u(T)]^2 + [k_P(S_A) \cdot u(P)]^2 + [k_W(S_A) \cdot u(W)]^2} = \sqrt{[u_n(S_A)]^2 + [u_T(S_A)]^2 + [u_P(S_A)]^2 + [u_W(S_A)]^2}. \quad (15)$$

Здесь $u(n)$, $u(T)$, $u(P)$, $u(W)$ – неопределенности измерения входных величин – показателя преломления, температуры, гидростатического давления и длины волны источника света соответственно; $k_n(S_A)$, $k_T(S_A)$, $k_P(S_A)$, $k_W(S_A)$ – коэффициенты чувствительности для выходной величины (S_A) отдельно по каждой из четырех входных величин; $u_n(S_A)$, $u_T(S_A)$, $u_P(S_A)$, $u_W(S_A)$ – соответствующие составляющие суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A)$.

Для решения прямых и обратных задач используем уравнения, которые связывают между собой неопределенности входных и выходных величин для МПП (табл. 13).

Таблица 13. Уравнения для решения метрологических задач МПП

Прямые задачи	Обратные задачи
(4.1) $u_n(S_A) = k_n(S_A) \cdot u(n)$	(4.5) $u(n) = u_n(S_A) / k_n(S_A)$
(4.2) $u_T(S_A) = k_T(S_A) \cdot u(T)$	(4.6) $u(T) = u_T(S_A) / k_T(S_A)$
(4.3) $u_P(S_A) = k_P(S_A) \cdot u(P)$	(4.7) $u(P) = u_P(S_A) / k_P(S_A)$
(4.4) $u_W(S_A) = k_W(S_A) \cdot u(W)$	(4.8) $u(W) = u_W(S_A) / k_W(S_A)$

Из условия равенства вкладов всех составляющих для условной заданной величины суммарной неопределенности абсолютной солености $u_{\Sigma}(S_A)=0,002$ г/кг получим следующее значение неопределенности для каждой из четырех составляющих суммарной неопределенности:

$$u_n(S_A) = u_T(S_A) = u_P(S_A) = u_W(S_A) = \sqrt{[u_{\Sigma}(S_A)]^2 / 4} = \sqrt{(0,002)^2 / 4} = 0,001, \text{ г / кг}. \quad (16)$$

Путем вариативных расчетов применительно к широким диапазонам изменения входных величин ($P = 0-100$ МПа, $T = 0-30$ °С, $S_A = 0-42$ г/кг, $W = 410-700$ нм) определены следующие максимальные значения коэффициентов чувствительности:

$$\begin{aligned} k_n(S_A) &= 5914,2, \text{ (г/кг)/1;} \\ k_T(S_A) &= 0,863, \text{ (г/кг)/(°С);} \\ k_P(S_A) &= 0,0106, \text{ (г/кг)/дбар;} \\ k_W(S_A) &= 0,735, \text{ (г/кг)/нм.} \end{aligned} \quad (17)$$

Для сравнения в [5] имеется таблица данных $\{u(n), u_n(S_A)\}$ уравнения прямой задачи (4.1). Нашим расчетом установлено, что соответствующий данным [5] коэффициент чувствительности равен $k_n(S_A) = 5400$ (г/кг)/1. Это значение является достаточно близким к выше найденному нами максимальному значению коэффициента $k_n(S_A)$ (17) и меньше его на 8,7 %.

На рис. 4 показаны графики уравнения прямой задачи (4.1) для МПП при различных условиях среды (P , T , S_A , W) и результат решения обратной метрологической задачи (4.5) (пунктир) при условиях (16) и (17). Из рис. 4 также следует, что коэффициент чувствительности $k_n(S_A)$ мало зависит от изменения длины волны источника света.

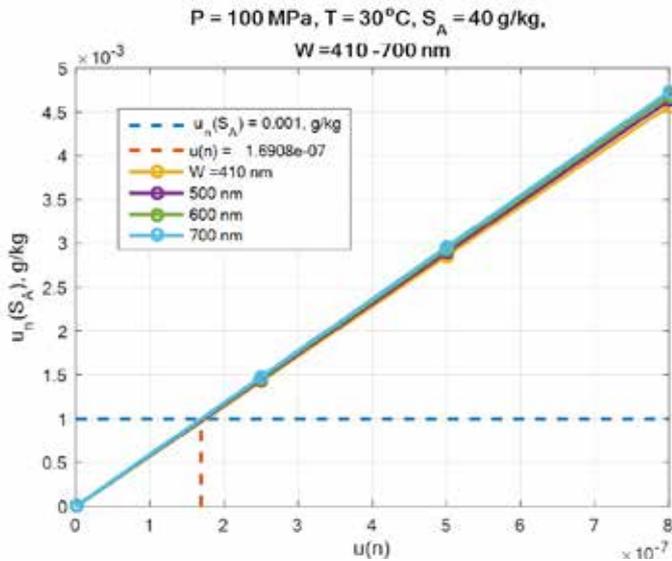


Рис. 4. Графики уравнения прямой задачи (4.1) в зависимости от длины волны источника света

В табл. 14 представлены рассчитанные по уравнению (4) диапазоны относительного изменения коэффициентов чувствительности для абсолютной солености при изменении условий среды (P, T, S_A, W). Из табл. 14 следует, что коэффициенты чувствительности для S_A по входным величинам n, T, P и W могут изменяться в пределах до 8, 25, 32 и 71 % соответственно.

Таблица 14. Диапазоны изменения коэффициентов чувствительности для МПП

$\delta k_i = (k_{i \max} - k_{i \min}) / k_{i \max} \cdot 100, \%$	$P = 0-100$ МПа, $T = 30$ °С, $S_A = 40$ г/кг, $W = 410$ нм	$T = 0-30$ °С, $P = 100$ МПа, $S_A = 40$ г/кг, $W = 410$ нм	$S_A = 0-40$ г/кг, $P = 100$ МПа, $T = 30$ °С, $W = 410$ нм	$W = 410-700$ нм, $P = 100$ МПа, $T = 30$ °С, $S_A = 40$ г/кг
$\delta k_n(S_A), \%$	6,8	7,5	0	3,5
$\delta k_T(S_A), \%$	16	6,1	24,9	11,7
$\delta k_P(S_A), \%$	16,5	6,9	4	31,7
$\delta k_W(S_A), \%$	34,2	6,1	0,9	70,7

Таблица 15. Оценки суммарной неопределенности S_A для теоретических (U1) и реальных (U2) сенсоров для МПП

Показатель	$k_p \max$	$u_p \min (U1)$	$u_p (U2)$	$(U2 / U1)$
	Расчет	Расчет	[3, 6]	
$k_n(S_A), (г/кг)$	5914,2	–	–	–
$u(n), –$	–	1,6908e-07	4e-7–800e-7	2,4–473,2
$k_T(S_A), (г/кг)/(°С)$	0,863	–	–	–
$u(T), °С$	–	0,001159	0,002–0,005	1,7–4,3
$k_P(S_A), (г/кг)/дбар$	0,0106	–	–	–
$u(P), дбар$	–	0,09431	0,42-3	4,5–31,8
$k_W(S_A), (г/кг)/нм$	0,735	–	–	–
$u(W), нм$	–	0,00136	0,005	3,7
$u_{\Sigma}(S_A), г/кг (15)$	–	0,002	0,0065–0,4742	3,3–237,1

Посредством решения обратных метрологических задач (табл. 13) при условии (16) с использованием максимальных коэффициентов чувствительности (17) в работе найдены предельные расчетные значения неопределенностей теоретических сенсоров входных величин для МПП. В табл. 15 приведены значения неопределенностей теоретических (U1) и реальных (U2) [8, 15] сенсоров входных величин, а также результаты расчета оценок суммарной неопределенности абсолютной солености как для теоретических, так и для реальных сенсоров входных величин для МПП.

Из табл. 15 следует, что для определения абсолютной солености методом показателя преломления с неопределенностью порядка 0,002 г/кг необходимо создать и использовать для измерений *in situ* входных величин n, T, P и отдельно для определения частоты источника света W измерительные каналы с точностью порядка $1,7 \cdot 10^{-7}$; 0,001 °С, 0,09 дбар и 0,001 нм соответственно. Следует отметить, что реальные неопределенности результатов измерений входных величин существующими коммерческими сенсорами пока значительно превышают указанные расчетные показатели. Поэтому при использовании существующих коммерческих сенсоров метод показателя преломления может пока обеспечивать слишком грубое определение абсолютной солености морской воды с точностью, которая ниже требуемой в пределах от 3-х до 240 раз.

Заключение

В работе для широких диапазонов изменения входных величин рассчитаны максимальные значения 13 коэффициентов чувствительности выходной величины солености по входным величинам для каждого из четырех методов. Значения этих коэффициентов сведены в табл. 16.

В дальнейшем при практической реализации какого-либо из четырех рассмотренных методов соответствующие коэффициенты могут быть использованы для решения прямых и обратных задач, и оценивания требуемой точности сенсоров входных величин при любом заданном уровне неопределенности выходной величины (S_p или S_A). Кроме того, с использованием результатов исследований, полученных в данной работе, стано-

Таблица 16. Сводная таблица максимальных значений коэффициентов чувствительности

1) МОЭ	$k_c(S_p), 1/(мС/см)$	$k_T(S_p), 1/(°C)$	$k_p(S_p), 1/дбар$	–
	1,367	1,378	0,000725	–
2) МСЗ	$k_c(S_A), (г/кг)/(м/с)$	$k_T(S_A), (г/кг)/(°C)$	$k_p(S_A), (г/кг)/дбар$	–
	1,745	4,066	0,0286	–
3) МП	$k_p(S_A), (г/кг)/(кг/м³)$	$k_T(S_A), (г/кг)/(°C)$	$k_p(S_A), (г/кг)/дбар$	–
	1,444	0,583	0,00625	–
4) МПП	$k_n(S_A), (г/кг)/1$	$k_T(S_A), (г/кг)/(°C)$	$k_p(S_A), (г/кг)/дбар$	$k_w(S_A), (г/кг)/нм$
	5914,2	0,863	0,0106	0,735

вится возможным при планировании экспедиций производить оценку достижимых неопределенностей при косвенном определении солёности с учетом точности, имеющихся в наличии реальных приборов.

С целью сравнения различных методов косвенного определения солёности получены соотношения неопределенностей реальных и теоретических (расчетных) сенсоров для условного базового уровня неопределенности солёности (0,002 или 0,002 г/кг). В сводной табл. 17 представлены значения и соотношения реальных (1) и расчетных неопределенностей сенсоров входных величин для этого условного уровня.

Таблица 17. Сводная таблица значений и отношений реальных (1) и расчетных неопределенностей сенсоров входных величин

Метод	$u(C)$	$u(c)$	$u(\rho)$	$u(n)$	$u(T)$	$u(P)$	$u(W)$
	мС/см	м/с	кг/м³	–	°C	дбар	нм
Значения неопределенностей							
(1)	0,001	0,015	0,003	4e-07	0,002	0,42	0,005
МОЭ	0,001	–	–	–	0,001	0,42	–
МСЗ	–	0,00066	–	–	0,0003	0,04	–
МП	–	–	0,0008	–	0,002	0,18	–
МПП	–	–	–	1,69e-07	0,001	0,094	0,0014
Отношения неопределенностей							
(1)/МОЭ	1,0	–	–	–	2,0	1,0	–
(1)/МСЗ	–	22,7	–	–	6,7	10,5	–
(1)/МП	–	–	3,75	–	1	2,3	–
(1)/МПП	–	–	–	2,37	2	4,5	3,6

Из табл. 17 следует, что наилучшим соответствием между реальными и расчетными неопределенностями сенсоров входных величин обладает метод МОЭ, а посредственным – метод МСЗ. Это говорит о том, что для принятого базового уровня неопределенности солёности метод МОЭ является реализуемым, а метод МСЗ требует усовершенствования при современном уровне техники. Методы МП и МПП практически эквивалентны по своим соотношениям с реальными неопределенностями измерений и по характеристикам точности занимают промежуточное положение между МОЭ и МСЗ, но ближе к МОЭ. Метод МПП уже реализуем в макетных образцах, а метод МП реализуем пока только в лабораторных условиях и требует усовершенствование сенсоров для измерения плотности *in situ*.

Выводы

Метод относительной электропроводности используется в океанографических исследованиях уже многие десятилетия и до сих пор является основным методом для косвенного определения практической солёности. Он обладает наименьшими (1,0–2,0) условными соотношениями между неопределенностями реальных и расчетных датчиков, но имеет при этом столь существенные неустранимые недостатки, что в перспективе его желательно заменить.

Метод скорости звука обладает наибольшими (6,7–22,7) условными соотношениями между неопределенностями реальных и расчетных датчиков и может рассматриваться как перспективный для использования вместо МОЭ в зонах с высокой изменчивостью структуры солевого состава, к которым, в частности, относится шельфовая зона океанов и морей.

Два последних метода, метод плотности и метод показателя преломления, обладают умеренными условными соотношениями реальных и расчетных неопределенностей датчиков (1–3,75) и (2–4,5) соответственно. Это позволяет надеяться, что при соответствующем развитии и совершенствовании приборной базы оба этих метода могут рассматриваться как перспективные для замены широко используемого в настоящее время метода относительной электропроводности.

Полученные результаты позволяют выполнять оценивание требуемой точности сенсоров входных величин при любом заданном уровне неопределенности выходной величины или точности выходной величины при любом заданном уровне не-

определенности сенсоров входных величин. Из трех перспективных методов косвенного определения солености *in situ*, метод показателя преломления является наилучшим кандидатом для замены метода

относительной электропроводности в ближайшем будущем.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ госрегистрации 121122300070-9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Perkin R., Lewis E. The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the Date // IEEE J. of Oceanic Engineering. 1980. Vol. 5, Iss. 1. P. 9–16. <https://doi.org/10.1109/JOE.1980.1145441>
2. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties. Paris: UNESCO, 2015. 196 p. (Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides; №. 56) URL: https://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf (дата обращения: 01.12.2022). <https://doi.org/10.25607/OBP-1338>
3. Millard R., Seaver G. An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density and wavelength // Deep Sea Research Part A. 1990. Vol. 37, Iss. 12. P. 1909–1926. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90086-B](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90086-B)
4. Quan X., Fry E.S. Empirical equation for the index of refraction of seawater // Appl. Opt. 1995. Vol. 34, Iss. 18. P. 3477–3480. <https://doi.org/10.1364/AO.34.003477>
5. Le Menn M., Naïr R. Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater // Front. Mar. Sci. 2022. Vol. 9. 1031824. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031824>
6. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Estimation of the uncertainty of the practical salinity measurements of sea water in oceanographic studies // Environmental control systems. Sevastopol: IPTS, 2018. No. 11 (31). P. 13–22.
7. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM GUM): JCGM 100-2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2008. 134 p. URL: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (дата обращения: 01.12.2023).
8. Levashov D.E. Technique of expeditionary research: Instrumental methods and technical means for assessing commercially significant environmental factors. Moscow: Publishing house of VNIRO, 2003. 400 p.
9. Pawlowicz R. The absolute salinity of seawater diluted by river water // Deep Sea Research Part 1. 2015. Vol. 101. P. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.03.006>
10. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Sound velocity profilers and an algorithm for determining the density of water for the oceanographic range // Monitoring systems of environment. Sevastopol: IPTS, 2017. No. 8 (28). P. 11–15.
11. Fujii K., Masui R. Accurate measurements of speed of sound velocity in pure water by combining a coherent phase-detection technique and a variable path length interferometer // J. Acoust Soc. Am. 1993. Vol. 93, Iss. 1. P. 276–282. <https://doi.org/10.1121/1.405661>
12. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Estimating quality of indirect measurements of sea water sound velocity by CTD data // Measurement. 2021. Vol. 175. 109073. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109073>
13. Wolf H. Determination of water density: limitations at the uncertainty level of 1×10^{-6} // Accreditation and Quality Assurance. 2008. Vol. 13. P. 587–591. <https://doi.org/10.1007/s00769-008-0442-2>
14. Schmidt H., Wolf H., Hassel E. A method to measure the density of seawater accurately to the level of 10^{-6} // Metrologia. 2016. Vol. 53, No. 2. P. 770–786. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/2/770>
15. Millero F.J., Huang F. The density of seawater as a function of salinity (5–70 g/kg) and temperature (273.15 to 363.15 K) // Ocean Sci. 2009. Vol. 5, Iss. 2. P. 91–100. <https://doi.org/10.5194/os-5-91-2009>
16. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. The Input Parameters Measurement Uncertainty When Calculating the Sea Water Density // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEast-Con.2018.8602591>

Сведения об авторах

ГРЕКОВ Александр Николаевич, к.т.н., заместитель руководителя центра

Институт природно-технических систем

Адрес: ИПТС, ул. Ленина, д. 28, г. Севастополь, РФ, 299011

Область научных интересов: измерения и метрология, океанографическое приборостроение, машинное обучение, подводная акустика

E-mail: i@angrekov.ru

ORCID: 0000-0001-5816-5615, **ResearcherID:** N-5097-2017,

Scopus Author ID: 57204761335, **SPIN-код:** 2491-8701,

AuthorID: 824395

ГРЕКОВ Николай Александрович, д.т.н., г.н.с.

Институт природно-технических систем

Адрес: ИПТС, ул. Ленина, д. 28, г. Севастополь, РФ, 299011.

Область научных интересов: измерения и метрология, океанографическое приборостроение, машинное обучение, подводная акустика

E-mail: ngrekov1@ya.ru

Scopus Author ID: 55289251200, **SPIN-код:** 7316-5225,

AuthorID: 871792

СЫЧЕВ Евгений Николаевич, к.т.н., доцент, зав. лабораторией Институт природно-технических систем

Адрес: ИПТС, ул. Ленина, д. 28, г. Севастополь, РФ, 299011

Область научных интересов: Математическое моделирование, компьютерные программы, численные методы решения обратных задач теплофизики и гидрофизики, разработка уравнений состояния морской воды, методы оценки неопределенностей морских измерений, решение прямой и обратной задач метрологии

E-mail: sychov-e@rambler.ru

Scopus Author ID: 57206483388, **SPIN-код:** 7140-8669,

AuthorID: 878797

Для цитирования:

Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ СЕНСОРОВ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ПРИ КОСВЕННОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОЛЕННОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 1 (47). С. 59–73. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_47_01_05. EDN: LYOHNT.

ASSESSMENT OF REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF THE OCEANOGRAPHIC PROBE SENSORS FOR INDIRECT DETERMINATION OF SEAWATER SALINITY

A.N. Grekov, N.A. Grekov, E.N. Sychov

Target. The issues of measuring the mass of dissolved substances or absolute salinity under environmental conditions in situ using automated instruments still remain open. How these issues are likely to be resolved depends on the development of new oceanographic measurement technologies. Salinity is one of the seawater parameters that cannot yet be directly measured in situ. Until now, all known, existing or promising, methods for determining salinity are indirect. The purpose of this work is to find the maximum sensitivity coefficients in order to assess the uncertainty of sensors of input quantities and compare various methods for indirect determination of salinity.

Methods and results. To solve this problem, the work uses methods of direct and inverse metrology problems. In this work, these problems were solved for four fundamentally different methods of indirect (calculated) determining of the salinity of sea water: 1) the relative electrical conductivity method (RCM), 2) the speed of sound method (SSM), 3) the density method (DM) and 4) the refractive index method (RIM). Depending on environmental conditions, the maximum values of sensitivity coefficients (13 coefficients in total) for the output value (salinity) were found for all input parameters of each method. By solving inverse problems for the accepted conditional base level of salinity uncertainty and at maximum sensitivity coefficients, estimates of the uncertainty of sensors of input parameters for each of the four methods were calculated.

Conclusions. The results obtained make it possible to estimate the required accuracy of sensors of input quantities at any given level of uncertainty of the output quantity or the actual accuracy of the output quantity at any given level of uncertainty of sensors of input quantities. From the three promising methods for indirect salinity determination, MPP is the best candidate to replace MOE in the near future.

Keywords: sea water, conductivity, speed of sound, density, refractive index, salinity, measurement, sensor, oceanographic probe, indirect measurements, uncertainty, metrology

References

1. Perkin R., Lewis E. The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the Date. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 1980, Vol. 5, iss. 1, pp. 9-16. <https://doi.org/10.1109/JOE.1980.1145441>
2. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties. Paris: UNESCO, 2015. 196 p. (Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides; №. 56) URL: https://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf (December 01, 2022) <https://doi.org/10.25607/OBP-1338>
3. Millard R., Seaver G. An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density and wavelength. *Deep Sea Research Part A*, 1990, Vol. 37, iss. 12, pp. 1909-1926. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90086-B](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90086-B)
4. Quan X., Fry E.S. Empirical equation for the index of refraction of seawater. *Appl. Opt.*, 1995, Vol. 34, iss. 18, pp. 3477-3480. <https://doi.org/10.1364/AO.34.003477>
5. Le Menn M., Naïr R. Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater. *Front. Mar. Sci.*, 2022, Vol. 9, 1031824. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031824>
6. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Estimation of the uncertainty of the practical salinity measurements of sea water in oceanographic studies. *Environmental control systems*, Sevastopol: IPTS, 2018, Iss. 11 (31), pp. 13-22.
7. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM GUM): JCGM 100-2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2008. 134 p. URL: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (December 01, 2023)
8. Levashov D.E. Technique of expeditionary research: Instrumental methods and technical means for assessing commercially significant environmental factors. Moscow: Publishing house of VNIRO, 2003. 400 p.
9. Pawlowicz R. The absolute salinity of seawater diluted by river water. *Deep Sea Research Part 1*, 2015, Vol. 101, pp. 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.03.006>
10. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Sound velocity profilers and an algorithm for determining the density of water for the oceanographic range. *Monitoring systems of environment*, Sevastopol: IPTS, 2017, No. 8 (28), pp. 11-15.
11. Fujii K., Masui R. Accurate measurements of speed of sound velocity in pure water by combining a coherent phase-detection technique

and a variable path length interferometer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, Vol. 93, iss. 1, pp. 276-282. <https://doi.org/10.1121/1.405661>

12. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. Estimating quality of indirect measurements of sea water sound velocity by CTD data. *Measurement*, 2021, Vol. 175, pp. 109073. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109073>

13. Wolf H. Determination of water density: limitations at the uncertainty level of 1×10^{-6} . *Accreditation and Quality Assurance*, 2008, Vol. 13, pp. 587-591. <https://doi.org/10.1007/s00769-008-0442-2>

14. Schmidt H., Wolf H., Hassel E. A method to measure the density of seawater accurately to the level of 10^{-6} . *Metrologia*, 2016, Vol. 53, No. 2, pp. 770-786. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/2/770>

15. Millero F.J., Huang F. The density of seawater as a function of salinity (5-70 g/kg) and temperature (273.15 to 363.15 K). *Ocean Sci.*, 2009, Vol. 5, iss. 2, pp. 91-100. <https://doi.org/10.5194/os-5-91-2009>

16. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. The Input Parameters Measurement Uncertainty When Calculating the Sea Water Density. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, 3-4 October 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602591>

About the authors

GREKOV Aleksandr Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, deputy head

Institute of Natural and Technical Systems

Address: IPTS, Lenin St., 28, Sevastopol, RF, 299011

Area of scientific interests: Measurement and Metrology, Oceanographic Instrumentation, Machine Learning, Underwater Acoustics

E-mail: i@angrekov.ru

ORCID: 0000-0001-5816-5615

ResearcherID: N-5097-2017

Scopus Author ID: 57204761335

SPIN-код: 2491-8701

AuthorID: 824395

GREKOV Nikolay Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher

Institute of Natural and Technical Systems

Address: IPTS, Lenin St., 28, Sevastopol, RF, 299011

Area of scientific interests: Measurement and Metrology, Oceanographic Instrumentation, Underwater Acoustics

E-mail: ngrekov1@ya.ru

Scopus Author ID: 55289251200

SPIN-код: 7316-5225

AuthorID: 871792

SYCHOV Evgeniy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, head of laboratory,

Institute of Natural and Technical Systems,

Address: IPTS, Lenin St., 28, Sevastopol, RF, 299011

Area of scientific interests: Mathematical modeling, computer codes, numerical methods for solving of inverse problems of heat-physics and hydro-physics, development of equations of state of sea water, methods of evaluation of uncertainties of sea measurements, solving direct and inverse metrology problems

E-mail: sychov-e@rambler.ru

Scopus Author ID: 57206483388

SPIN-код: 7140-8669

AuthorID: 878797

