

О применении единиц измерения количества и состава вещества в океанологии

Рассмотрены способы перевода традиционных и внесистемных единиц измерения количества и состава вещества, которые применяются в океанологии, в Международную систему единиц (СИ). Коэффициенты пересчета представлены в табулированном виде. Приведена информация по единицам измерения минерализации (шкалы солёности) морской воды в океаническом диапазоне ее изменчивости, распресненных водах внутренних морей и рассолах. Обсуждено современное представление о солёности как о безразмерной величине.

В практике лабораторных и натурных измерений во всех областях науки и техники, в том числе и в океанологии, общепринятой является Международная система единиц (СИ). Решения XI Генеральной конференции по мерам и весам, которая в 1960 г. приняла Международную систему единиц, носили рекомендательный характер. После принятия ГОСТа 8.417-81 (СТ СЭВ 1052-78) «Единицы физических величин» применение единиц СИ считается обязательным при всех видах измерений [1 – 3]. В Украине с 1 января 1999 г. введены в действие нормативные документы ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97 и ДСТУ 3651.2-97, регламентирующие применение единиц СИ [4 – 6]. Кроме того, в XX веке несколько раз менялись определения и способы измерения одной из основных характеристик морской водной среды — солёности.

Однако вопреки современным требованиям в отечественной украинской и русскоязычной литературе по морским наукам и по химии моря, в частности, продолжается использование внесистемных и традиционных единиц измерения. Это тормозит окончательный переход к единой системе мер, затрудняет восприятие и сравнение результатов, опубликованных в отечественной и иностранной литературе, где применены единицы СИ, а также создает препятствия при формировании банков данных с использованием фондовых (архивных) материалов и при разработке информационно-поисковых систем. Поэтому авторы считают целесообразным обратить внимание на существующую проблему и рассмотреть способы перевода традиционных и внесистемных единиц, которые применяются в океанологии при измерении количества и состава вещества, в Международную систему единиц.

Рассмотрим основные единицы СИ, которые используются при измерении количества и состава вещества. В системе СИ единицей количества вещества является *моль* (*mol*) [4]. На практике также используются десятичные дольные единицы моля: миллимоль (*ммоль*, *mmol*) — 10^{-3} моль; микромоль (*мкмоль*, *μmol*) — 10^{-6} моль; наномоль (*нмоль*, *nmol*) — 10^{-9} моль; пикомоль (*пмоль*, *pmol*) — 10^{-12} моль.

Единицей массы в СИ является *килограмм* (*кг*, *kg*). На практике применяют десятичные дольные и кратные единицы массы: грамм (*г*, *g*) — 10^{-3} кг; миллиграмм (*мг*, *mg*) — 10^{-6} кг; микрограмм (*мкг*, *μg*) — 10^{-9} кг; тонна (*т*) — 10^3 кг.

Единицей объема (вместимости) в СИ является кубический метр (м^3 , м^3). Применяются десятичные дольные единицы кубического метра: дециметр кубический (дм^3) — 10^{-3} м^3 ; сантиметр кубический (см^3) — 10^{-6} м^3 . На практике приравнивают 1 дм^3 к 1 литру (л, *l*), 1 см^3 к 1 миллилитру (мл, *ml*). При этом пренебрегают тем, что литр определен как объем 1 кг чистой воды при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт.ст.) и температуре наибольшей плотности воды (4 °C) и на самом деле составляет $1,000028 \text{ дм}^3$. 12-я Генеральная конференция по мерам и весам (1964 г.) отменила это определение и приняла, что 1 л равен точно 1 дм^3 для всех случаев, которые не относятся к выражению результатов измерений высшей точности. Химико-аналитические измерения относятся к разряду наиболее точных, и Госстандарт рекомендует выражать объем в долях единицы кубического метра — дм^3 , см^3 .

Рассмотрим кратко способы выражения концентраций химических элементов природных вод при использовании внесистемных и традиционных единиц и их пересчет в единицы СИ.

В большинстве зарубежных стран и ранее в СССР до введения единиц измерения СИ использовалась традиционно сложившаяся смешанная система выражения результатов химического анализа морской воды [7, 8]. Газовый состав морской воды (сероводород, растворенный кислород, углекислый газ, азот и др.) выражался в миллилитрах на литр при нормальных условиях (температура 0°C, давление 760 торр), парциальное давление углекислого газа (P_{CO_2}) и кислорода (P_{O_2}) — в десятичных долях атмосферы ($n \cdot 10^{-4}$ атм) и в торрах. Концентрацию биогенных элементов (фосфатов, нитратов, нитритов, кремнекислоты, ионов аммония) выражали в мкг/л (или, равнозначно, $\text{мг}/\text{м}^3$) в расчете на химический элемент (P- PO_4 , N- NO_3 , N- NO_2 , N- NH_4 , Si- SiO_2). Щелочность (*Alk*) приводили в миллиграмм-эквивалентах на литр (мг-экв./л). Элементы основного солевого состава (натрий, калий, кальций, магний, стронций, сера сульфатов, хлор, иод, бром) выражали в граммах на килограмм и в мг-экв./л, бор — в мг/л, водородный показатель (символ pH) — в единицах pH (безразмерная величина), а микроэлементы — в мкг/л. Результаты химического анализа записывали в виде числа в целых и десятичных долях с точностью, которая обеспечивается определенным методом анализа для каждого компонента. При этом обычно придерживались следующих правил записи: величины хлорности, pH, сероводорода и растворенного кислорода записывали целым числом с двумя десятичными знаками; величину насыщения воды кислородом (%) — до десятичного знака; величину щелочности, отдельных компонентов основного солевого состава — до третьего десятичного знака; биогенные элементы и микроэлементы — до десятичного знака; величины концентраций нитратов, аммония и кремния, составляющие более 10 мкг/л, записывали целыми числами.

Из вышесказанного видно, что единообразие в способах выражения результатов определения химического состава морской воды не наблюдается.

В 30-х гг. XX в. Международной ассоциацией физической океанографии (МАФО) и Международным советом по изучению морей были предприняты попытки унификации единиц измерения состава морской воды. Соответствующими постановлениями рекомендовалось представлять результаты ана-

лизирован химического состава морской воды в атомной форме, при которой концентрация вещества выражается количеством вещества атома в единице объема. Компоненты состава морской воды выражались в дольных единицах грамм-атома: большинство — в миллиграмм-атом на литр (мг-ат/л), а биогенные элементы и микроэлементы — в микрограмм-атом на литр (мкг-ат/л), где литр — количество морской воды, занимающее при температуре 20 °С объем в 1 л [7]; и лишь отдельные измерения (хлорность, соленость) — в массовой форме (граммах), приведенных к килограмму воды (г/кг, ‰). При этом прежние формы выражения результатов определений — массовая и эквивалентная — на переходный период оставались для использования и работы с архивными материалами.

В СССР рекомендации МАФО были поддержаны Океанографической комиссией при Президиуме АН СССР. Насущная необходимость следовать этим рекомендациям становится особенно актуальной в конце 50-х гг. в связи с расширением международного сотрудничества и, в частности, активным участием советских океанологов в работах по программе «Международного геофизического года» (1957 – 1958 гг.) и последующим «Международным геофизическим сотрудничеством».

Применение грамм-атомной формы выражения результатов анализа морской воды в определенной мере привело к их унификации. Однако окончательное решение вопроса стало возможным лишь с введением Международной системы единиц. Преимущество этой системы состоит не только в регламентации. В отличие от выражения результатов анализа в массовой форме применение единиц СИ облегчает сопоставление различных компонентов анализа и интерпретацию результатов измерений.

Итак, исходя из представления о морских и пресных водах как природных растворах, концентрация веществ в них в соответствии с Международной системой единиц выражается *молярной концентрацией* — числом молей растворенного вещества в одном кубическом метре (моль/м³, *mol/m³*). В практике гидрохимических исследований применяются также десятичные дольные единицы моля в кубическом метре или кубическом дециметре (литре) раствора (моль/дм³, моль/л).

Содержание большинства химических компонентов в морской воде удобно выражать в дольных (тысячных) единицах моля — миллимоль на литр (ммоль/л, *mmol/l*). Для микроэлементного состава природных вод, концентрации которых составляют $\leq 10^{-4}$ % по массе, используются такие дольные единицы моля, как микромоль/л (мкмоль/л, *μmol/l*), наномоль на литр (нмоль/л, *nmol/l*), пикомоль на литр (пмоль/л, *pmol/l*). В литературе молярная концентрация иногда обозначается символом *M* с указанием числа молей или дольной единицы моля, напр., 0,02 *M* раствор NaCl, или 5,2 мМ N-NO₃ (нитратного азота), или 5 нМ Hg. При этом символ *M* тождествен размерности моль/л, если исходить из определения молярной концентрации.

В принципе, результаты морских гидрохимических определений должны приводиться к одному килограмму морской воды [7]. Такой способ выражения концентрации — *моляльность* — определяют как количество вещества в молях, которое растворено в массе растворителя, равной одному килограмму (моль/кг, *mol/kg*). При этом, как и при использовании молярной концентра-

ции, применяются также дольные единицы – миллимоль на килограмм (ммоль/кг, *mmol/kg*), микромоль на килограмм (мкмоль/кг, *μmol/kg*) и т.д. Для обозначения моляльности используют также символ M_n (M_l) с указанием числа молей или дольных единиц моля, напр., 0,02 M_n NaCl или 5,2 M_n N-NO₃. Здесь символ M_n (M_l) тождествен размерности моль/кг (*mol/kg*).

Для выражения концентрации вещества в моль/кг концентрацию вещества в моль/л делят на «удельный вес» (относительную плотность) морской воды при 20 °С. Расчет ведут по формуле:

$$C_x = \frac{C_n}{1 + \frac{\rho_{20}}{1000}},$$

где C_x — концентрация ингредиента в моль/кг; C_n — концентрация ингредиента в моль/л; ρ_{20} — относительная плотность морской воды при 20 °С.

Пересчет данных в моль/кг из моль/л возможен также при помощи коэффициентов, приведенных в табл. 1 [9].

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты пересчета (K) из моль/л в моль/кг концентраций химических веществ, измеренных в морской воде при температуре 20°С [9]

Соленость, ‰	K	Соленость, ‰	K	Соленость, ‰	K	Соленость, ‰	K
2	1,0000	12	0,9927	22	0,9852	32	0,9780
3	0,9995	13	0,9919	23	0,9845	33	0,9773
4	0,9987	14	0,9912	24	0,9838	34	0,9765
5	0,9979	15	0,9905	25	0,9830	35	0,9758
6	0,9972	16	0,9897	26	0,9823	36	0,9750
7	0,9964	17	0,9889	27	0,9816	37	0,9743
8	0,9957	18	0,9882	28	0,9809	38	0,9736
9	0,9949	19	0,9875	29	0,9801	39	0,9729
10	0,9942	20	0,9867	30	0,9794	40	0,9721
11	0,9934	21	0,9860	31	0,9787	41	0,9714

В случае определения химического ингредиента с погрешностью, равной или превышающей разницу между плотностью морской и дистиллированной воды (≥ 3 ‰), допускается выражение результатов определения как в единицах моль/кг, так и в моль/л. При этом считают, что оба выражения равнозначны в пределах точности анализа [7].

Иногда молекулярная или атомная масса какого-либо компонента состава воды неизвестна или не может быть измерена, поскольку лишена физического смысла, например, общий белок, хлорофилл, общая взвесь, соленость, минерализация, органическое вещество и др. В этом случае в качестве единицы измерения используют массовую концентрацию в размерностях масса-объем (напр., г/дм³, мг/дм³ или мкг/дм³) или масса-масса (г/кг, мг/кг, мкг/кг), а также в виде массовой доли вещества в процентах (%), промилле (‰), в миллионных (частях на миллион частей, млн⁻¹, *ppt*) или миллиардных (частях на миллиард частей, млрд⁻¹, *ppb*) долях.

**Коэффициенты k пересчета массовых концентраций
некоторых компонентов химического состава морской воды
в молярные концентрации**

Вещество	M_r	Единицы концентрации		k
		массовые	молярные	
1	2	3	4	5
Натрий, Na^+	22,989768	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	43,4976 1,0000
Магний, Mg^{2+}	24,3050	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	41,1438 0,50000
Кальций, Ca^{2+}	40,078	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	24,9513 0,5000
Калий, K^+	39,0983	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	25,5765 1,0000
Стронций, Sr^{2+}	87,6210	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	11,4128 0,5000
Хлориды, Cl^-	35,4527	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	28,2066 1,0000
Сульфаты, SO_4^{2-}	96,0636	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	10,4098 0,5000
Бромиды, Br^-	79,904	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	12,5150 1,0000
Фториды, F^-	18,998403	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	52,6360 1,0000
Иодиды, I^-	129,90447	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	7,6980 1,0000
Гидрокарбонат (щелочность), HCO_3^-	61,01714	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	61,0171 1,0000
Бор как H_2BO_3^-	61,83402	г/кг мг-экв./кг	ммоль/кг	16,4403 1,0000
Бор, В	10,812	мг/л	ммоль/кг	92,4998
Диоксид углерода, CO_2	44,0098	мл/л	мкмоль/кг	44,92
Парциальное давление, P_{CO_2}	44,0098	торр $1 \cdot 10^{-4}$ атм	кПа	13,332 1,01323
Кислород растворенный, O_2	31,9988	мл/л мкг-ат /л	мкмоль/л	44,66 0,5000
Парциальное давление, P_{O_2}	31,9988	торр	кПа	13,332
Сероводород, H_2S	34,0819	мл/л	мкмоль/л	45,16
Метан, CH_4	16,04276	мл/л	ммоль/кг	44,68
Азот, N_2	28,01348	мл/л	мкмоль/л	44,64
Азот аммонийный, N-NH_4	14,00674	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,07139 1,0000

1	2	3	4	5
Азот нитратный, N-NO ₃	14,00674	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,07139 1,0000
Азот нитритный, N-NO ₂	14,00674	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,07139 1,0000
Азот общий, N _{общ}	14,00674	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,07139 1,0000
Мочевина, NH ₂ CONH ₂	60,05564	мкг/л	ммоль/кг	0,01665
Фосфор фосфатный, P-PO ₄	30,973762	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,03229 1,0000
Фосфор общий, P _{общ}	30,973762	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,03229 1,0000
Фосфор взвешенный, P _{взв}	30,973762	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,03229 1,0000
Кремнекислота, Si-SiO ₂	28,0855	мкг/л мкг-ат /л	мкмоль/л	0,03561 1,0000
Углерод, C	12,011	мг/л	ммоль/л	0,08326
Железо, Fe	55,847	мкг/л	мкмоль/л	0,01791
Марганец, Mn	54,93805	мкг/л	мкмоль/л	0,01820
Медь, Cu	63,546	мкг/л	мкмоль/л	0,01574
Мышьяк, As	74,92159	мкг/л	нмоль/л	13,3473
Ртуть, Hg	200,59	мкг/л	нмоль/л	4,9853
Серебро, Ag	107,8682	мкг/л	нмоль/л	9,2706
Свинец, Pb	207,20	мкг/л	нмоль/л	4,8263
Кадмий, Cd	112,411	мкг/л	нмоль/л	8,8959
Кобальт, Co	58,93320	мкг/л	нмоль/л	16,9684
Никель, Ni	58,690	мкг/л	мкмоль/л	0,01704
Хром, Cr	51,9961	мкг/л	мкмоль/л	0,01923
Цинк, Zn	65,390	мкг/л	мкмоль/л	0,01577

В табл. 2 приведены коэффициенты k для пересчета массовых концентраций химических элементов в молярные. При их расчете использованы относительные атомные массы по Международной таблице 1987 г. Коэффициенты для пересчета микроэлементов относятся к сумме всех форм химического элемента, присутствующих в природной воде. Для пересчета конкретной формы химического элемента расчет коэффициента k ведется исходя из величины молярной массы эквивалента данной формы элемента. Например, измеренная концентрация двухвалентного железа Fe^{2+} в воде Черного моря на глубине 200 м составляет 5,6 мкг/л. Фактор эквивалентности $f_{\text{эк}}(\text{Fe}^{2+})$ равен 1/2. Отсюда молярная масса эквивалента $M(\text{Fe}^{2+}) = 1/2 M_{\text{Fe}} = 1/2 \cdot 55,847 = 27,9235$ мг/ммоль, а коэффициент k равен $1:27,9235 = 0,03581$. Искомая концентрация составляет

$$C_{Fe^{2+}} = 5,6 \cdot 0,03581 = 0,2 \text{ мкмоль/л.}$$

Пересчет массовой концентрации сероводорода в молярную выполняется исходя из величины молярного объема H_2S , которая при нормальных условиях ($t = 0^\circ C$, давление 760 торр) равна 22,414 л/моль, и относительной молекулярной массы $M_r(H_2S) = 34,0819$. Отсюда масса 1 мл H_2S составляет 1,53928 мг. Тогда 1 мл H_2S равен $1,53928 : 34,0819 = 0,04516 \text{ ммоль} = 45,16 \text{ мкмоль}$. Таким образом, $k(H_2S) = 45,16$. Аналогичным способом получен пересчетный коэффициент для кислорода. Однако при этом принималось во внимание, что растворенный кислород в морской воде присутствует преимущественно в молекулярной форме. В качестве исходных величин для расчета $k(O_2)$ использовались относительная молекулярная масса $M_r(O_2) = 31,9988$ и молярный объем кислорода, равный при нормальных условиях 22,393 л/моль (табл. 2).

Ранее использовавшаяся эквивалентная форма выражения результатов определений (г-экв./л, мг-экв./л) подлежит замене на единицу СИ моль/л или дольные единицы — ммоль/л, мкмоль/л и т.д. Для пересчета значение концентрации в эквивалентах на литр делят на валентность элемента. Атомная форма выражения результатов анализа одновалентных ионов тождественна молярной. При пересчете парциального давления диоксида углерода, которое выражали в торрах или десятичных долях атмосферы ($n \cdot 10^{-4}$ атм), исходили из соотношений: $1 \cdot 10^{-4} \text{ атм} = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ торр}$; $1 \text{ торр} = 1,3332 \cdot 10^{-2} \text{ Па (Pa)}$ или $13,332 \text{ кПа (kPa)}$. В старой литературе иногда встречается такое выражение концентрации, как миллиграмм-процент (мг %) — количество вещества в миллиграммах в 100 мл воды. Пересчет мг % в единицы СИ выполняется по формуле: $\text{ммоль/л} = \text{мг \%} \cdot 10 / M_r$.

Помимо компонентного состава в океанологии измеряется и широко используется одна из основных характеристик морской воды — соленость.

За прошедшее время наиболее широкое распространение получили такие понятия и методы определения солености морской воды, как абсолютная (истинная) соленость (S_A), соленость по Сёренсену (S_S), соленость по Кнудсену — Сёренсену (S_{K-S}), соленость по Коксу (S_{Cox}), соленость по практической шкале 1978 года (ШПС-1978, S_{1978}) и, наконец, соленость рассолов по Боме (Bome, °Be).

Абсолютная (истинная) соленость — это массовая доля всех растворенных твердых минеральных веществ (m_S) в определенной массе морской воды (m_{SW}):

$$S_A = \frac{m_S}{m_{SW}}. \quad (1)$$

Это безразмерная величина, она может быть представлена в различных долях относительных единицах: в процентах — $S_A(\%) = S_A \cdot 100$; в промилле (тысячных долях) — $S_A(\text{‰}) = S_A \cdot 1000$. Абсолютная соленость может быть оценена только экспериментально посредством полного химического анализа (определение суммарной массы главных ионов в одном килограмме морской воды).

В связи с высокой трудоемкостью этих измерений Сёренсен в 1901 г. предложил принимать за соленость массу сухого остатка в граммах всех твердых минеральных растворенных веществ, содержащихся в одном килограмме морской воды, при условии, что бром и йод замещены эквивалентным количеством хлора, все углекислые соли превращены в окислы, а все органические вещества сожжены при температуре $480^\circ C$ [10]. S_S — величина, выраженная в промилле (‰).

Однако и этот метод измерения оказался достаточно трудоемким при его применении в условиях качающегося судна. Тогда, используя принцип примерного постоянства солевого состава (межионных соотношений), Кнудсен и Сёренсен установили взаимосвязь между массой сухого остатка (соленостью S_S) и хлорностью Cl (‰) в пробах натуральной морской воды и предложили соленость определять (вычислять) по хлорности.

Для воды с океанским солевым составом соленость по Кнудсену – Сёренсену вычислялась по формуле

$$S_{K-S} = 0,03 + 1,805 Cl (\text{‰}), \quad (2)$$

где хлорность Cl (‰) измерялась по методу Мора-Кнудсена. Средняя квадратическая погрешность шкалы Кнудсена – Сёренсена для вод с океаническим солевым составом не превышает 0,01 ‰ в эквиваленте солености.

В зависимости от региональных особенностей солевого состава были разработаны следующие формулы. Для Черного моря [11]:

$$S_{K-S} = 0,1856 + 1,7948 Cl (\text{‰}); \quad (3)$$

для Азовского моря [11]:

$$S_{K-S} = 0,230 + 1,792 Cl (\text{‰}); \quad (4)$$

для Балтийского моря [12]:

$$S_{K-S} = 0,115 + 1,805 Cl (\text{‰}); \quad (5)$$

для Каспийского моря [12]:

$$S_{K-S} = 0,140 + 2,360 Cl (\text{‰}); \quad (6)$$

для Аральского моря [12]:

$$S_{K-S} = 0,260 + 2,791 Cl (\text{‰}). \quad (7)$$

По данным исследования Милеро [см., напр., 13], соленость S_{K-S} связана с абсолютной соленостью S_A для нормальной воды ($S_{K-S} = 35 \text{ ‰}$) соотношением

$$S_A = 1,0049 S_{K-S}. \quad (8)$$

Понятие солености по Кнудсену – Сёренсену и метод ее определения в океанографии использовались с 1902 по 1969 годы.

Соленость по Коксу S_{Cox} (‰) основана на взаимосвязи хлорности и относительной электропроводимости (R_{15}) натуральной морской воды. При этом соленость вычислялась по формуле

$$S_{Cox} = 1,80655 Cl (\text{‰}) \quad (9)$$

для 135 проб, собранных из всех регионов Мирового океана, и сопоставлялась с относительной электропроводимостью, в результате чего было получено следующее соотношение [14]:

$$S_{Cox} = -0,08996 + 28,2972 R_{15} + 12,80832 R_{15}^2 - 10,67869 \cdot R_{15}^3 + 5,98624 R_{15}^4 - 1,32311 R_{15}^5, \quad (10)$$

где $R_{15} = \frac{\chi(S, 15, 0)}{\chi(35, 15, 0)}$; $\chi(S, 15, 0)$ и $\chi(35, 15, 0)$ — удельные электропроводимости

воды с соленостью S и $S_{K-S} = 35 \text{ ‰}$ соответственно при $t = 15 \text{ °C}$ и атмосферном давлении $P = 0$. Средняя квадратическая погрешность установления шкалы Кокса в эквиваленте солености не превышает 0,004 и 0,01 ‰ для вод, имеющих хлорность выше и ниже 15 ‰ соответственно. Выражение (10) было принято международными организациями в качестве нового стандартного определения солености вод Мирового океана [15] и использовалось с 1969 по 1981 годы.

Шкала практической солености 1978 года (S_{1978}) основана на нормальной воде с исходной соленостью 35,000, которая имеет относительную электропроводимость $K_{15} = 1,000$ при атмосферном давлении и $t = +15 \text{ °C}$ по отношению к стандартному раствору хлорида калия с концентрацией 32,4356 г KCl

на килограмм раствора. ШПС-1978 устанавливает связь между относительной электропроводимостью растворов нормальной воды и соленостью. При этом пробы готовились из исходной нормальной воды атлантического происхождения с $K_{15} = 1,000$ и $Cl = 19,374$ ‰ путем разбавления дистиллированной водой или выпаривания проб, а соленость проб вычислялась по коэффициентам гравиметрического разведения или выпаривания. В этом случае солевой состав проб по всей шкале солености оставался неизменным и соответствовал составу исходной нормальной воды. Такая шкала солености в отличие от предыдущих может быть однозначно воспроизведена в любой аналитической лаборатории, располагающей необходимой инструментальной и метрологической базой. Связь практической солености S_{1978} с относительной электрической проводимостью в диапазоне $S = 2 - 42$ определяется формулой [16]:

$$S_{1978} = 0,0080 - 0,1692 R_{15}^{1/2} + 25,3851 R_{15} + 14,0941 R_{15}^{3/2} - 7,0261 R_{15}^2 + 2,7081 R_{15}^{5/2}. \quad (11)$$

Соленость (S_{1978}) — безразмерная величина, выражается в тысячных долях, но без указания знака ‰. ШПС-1978 используется с 1982 г. по настоящее время. Возможная средняя квадратическая погрешность ШПС-1978 не превышает 0,0008 при $t = 15^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении и не превышает 0,0015 в диапазонах изменения температуры от $-1,8$ до 30°C , солености от 2 до 42 и давления от 0 до 10000 дбар.

Взаимосвязь различных шкал солености для вод с океаническим солевым составом может быть определена по следующим соотношениям [17]:

$$(S_{K-S} - S_{Cox}) = 0,03 (1 - S_{Cox} / 35), \quad (12)$$

$$(S_{1978} - S_{K-S}) = (S_{1978} - S_{Cox}) - (S_{K-S} - S_{Cox}), \quad (13)$$

где разность ($S_{1978} - S_{Cox}$) может быть оценена с использованием формул (10) и (11) для конкретных значений R_{15} . В табл. 3 приведены в качестве примера величины различий: $10^3 (S_{1978} - S_{Cox})$ — верхняя строка, $10^3 (S_{1978} - S_{K-S})$ — нижняя строка при стандартном атмосферном давлении. Отдельной дополнительной строкой внизу приведена разность $10^3 (S_{K-S} - S_{Cox})$. Зависимость различия шкал солености S_{1978} , S_{Cox} , S_{K-S} от температуры проявляется в основном при сравнении результатов измерений *in situ*, полученных с помощью зондирующих CTD-систем.

Т а б л и ц а 3

Различия в шкалах солености

Температура, °C	Соленость (S_{1978})					
	2	10	20	30	35	40
-2	+29	+66	+50	+18	0	-16
	+1	+45	+37	+14	0	-12
0	+27	+59	+42	+15	0	-14
	-1	+38	+29	+11	0	-10
10	+21	+41	+22	+6	-1	-8
	-7	+20	+9	+2	-1	-4
20	+20	+39	+16	+4	0	-8
	-8	+18	+3	0	0	-4
30	+22	+43	+15	+2	0	-6
	-6	+22	+2	-2	0	-2
$10^3(S_{K-S} - S_{Cox})$	+28	+21	+13	+4	0	-4

При измерении концентрации солей в водах с $S \geq 50\%$ (рассолах) соленость выражается в процентах по массе или в более старых единицах — градусах Боме́. Шкала Боме́ построена таким образом, что ее ноль соответствует плотности дистиллированной воды, а $15^\circ Be$ — плотности 15 %-ного водного раствора NaCl. В зависимости от температуры, при которой строится шкала ареометра Боме́, аналитические выражения взаимосвязи концентрации с плотностью (удельным весом) могут быть различными [18]. Крепость (концентрация) раствора определяется с помощью ареометра Боме́. В табл. 4 в качестве примера приведены разные шкалы ареометров Боме́ для растворов высокой плотности: $^\circ Be$ — крепость (концентрация, соленость) раствора в градусах Боме́; $d_{12,5}$, d_{15} , $d_{17,5}$, $d_{15,56}$ — относительный удельный вес раствора при температуре 12,5, 15, 17,5 и 15,56 °C соответственно.

Т а б л и ц а 4

Шкалы ареометров Боме́ [18]

Тип ареометра	Температура измерения, °C	Формула связи крепости раствора с удельным весом	Стандарт
Боме́	$10^\circ R = 12,5$	$d_{12,5} = \frac{145,88}{145,88 - ^\circ Be}$	—
Боме́ (старый)	17,5	$d_{17,5} = \frac{146,78}{146,78 - ^\circ Be}$	—
Боме́	15	$d_{15} = \frac{144,3}{144,3 - ^\circ Be}$	Рациональный (удельный вес относительно удельного веса дистиллированной воды при 4°C)
Боме́	15	$d_{15} = \frac{144,32}{144,32 - ^\circ Be}$	Французский (удельный вес относительно удельного веса дистиллированной воды при 4°C)
Боме́	$60^\circ F = 15,56$	$d_{15,56} = \frac{145}{145 - ^\circ Be}$	Американский
Боме́	12,5	$d_{12,5} = \frac{144}{144 - ^\circ Be}$	Голландский

Взаимосвязь концентрации рассолов в градусах Боме́ при температуре 15°C и в массовых процентах ($S\%$) может быть представлена следующими выражениями:

$$^\circ Be = 0,0729 + 0,916249(S\%) + 0,032577(S\%)^2 - 0,002419(S\%)^3 + 0,000049 \cdot (S\%)^4, \quad (14)$$

$$S \% = -0,10537 + 1,107651(^{\circ}\text{Be}) - 0,036102(^{\circ}\text{Be})^2 + 0,002598(^{\circ}\text{Be})^3 - 0,000052(^{\circ}\text{Be})^4. \quad (15)$$

Эти выражения получены для рациональной шкалы ареометра Боме (табл. 4) и табличных данных, приведенных в работе [19]. Наибольшие погрешности формул (14) и (15) не превышают $\pm 0,008^{\circ}\text{Be}$ и $\pm 0,03\%$ соответственно.

При сопоставлении архивных и современных данных по солености в задачах исследования долговременной изменчивости солености и химического состава вод Мирового океана, окраинных и внутренних морей, соленых озер и т.п. необходимо в обязательном порядке учитывать различия используемых шкал солености, а также их достоверность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г.Д. Справочник по Международной системе единиц. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 120 с.
2. Широков К.П., Богуславский М.Г. Международная система единиц. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 112 с.
3. ГОСТ 8.417-81. (СТ СЭВ 1052-78). ГСИ. Единицы физических величин. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 40 с.
4. ДСТУ 3651.0-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення. — Київ: Держстандарт України, 1998. — 9 с.
5. ДСТУ 3651.1-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці. Основні поняття, назви та позначення. — Київ: Держстандарт України, 1998. — 79 с.
6. ДСТУ 3651.2-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, позначення, назви та значення. — Київ: Держстандарт України, 1998. — 13 с.
7. Бруевич С.В. О стандартизации методов химического исследования и выражении анализов морских вод // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. — 1958. — 26. — С. 243 – 246.
8. Бруевич С.В. Методика химической океанографии. — М.: Изд-во Гидрометеослужбы, 1933. — 144 с.
9. Методические указания по химическому анализу морских вод для стран — членов СЭВ. — Гдыня, 1977. — 277 с.
10. Forch C., Knudsen M., Sørensen S.P. Berichte über die Konstantendestimmungen zur Aufstellung der Hydrographischen Tabellen. — D. Kgl. Danske Vidensk., Selsk., Skrifter, 6 Raekke Naturvidensk. og Math. — 1902. — Afd. 12. — H.1. — P. 1 – 151.
11. Цурикова А.П., Цуриков В.Л. О понятии «соленость» // Океанология. — 1971. — 11, вып. 2. — С. 339 – 342.
12. Истошин Ю.В. Океанология. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 469 с.
13. UNESCO Technical Papers in Marine Science. Eighth report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards. Paris, 11 – 13 Sept. 1978. — Paris, UNESCO. — 1979. — № 30. — 33 p.
14. International oceanographic tables. — Paris, Nation. inst. oceanogr. — Great Britain and UNESCO. — 1966, 1968. — 118p., 128 p.
15. Wooster W.S., Lee A.I., Ditrich G. Redefinition of salinity // Deep-sea Res. — 1969. — 16, № 3a. — P. 321 – 322.
16. Шкала практической солености, 1978 год, и международное уравнение состояния морской воды, 1980 год. Технические документы ЮНЕСКО по морским наукам. № 36. — Париж: ЮНЕСКО, 1981. — 25 с.
17. Обработка данных океанографической станции / Пер. с англ. Составлено редакционной коллегией ОГОТС. — Севастополь: ЮНЕСКО-МГИ, 1993. — 136 с.

18. *Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т.1.* — М.: Сов. энциклопедия, 1931. — 480 с.
19. *Данильченко П.Т., Понизовский А.М. Гидрохимия Сиваша.* — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — 128 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 09.10.02
После доработки 26.03.03

ABSTRACT Methods of converting traditional and miscellaneous units of measurements of substance amount and composition used in oceanology, to the International unit system (SI) is considered. Recalculation coefficients are represented in a table form. Presented is the information on measuring units of seawater mineralization (salinity scales) for the oceanic range of its variability, low-salinity waters of internal seas and brines. Contemporary notion on salinity as a non-dimensional quantity is discussed.