DOI: https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-21-27

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ МАТРИЧНЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

© **Валерий Васильевич Степановских*, Рашида Константиновна Хузагалеева, Елена Константиновна Колпакова**

Закрытое акционерное общество «Институт стандартных образцов», Россия, 620057, г. Екатеринбург, ул. Ульяновская, д. 13а; *e-mail: iso@icrm-ekb.ru

Статья поступила 12 декабря 2022 г. Поступила после доработки 22 декабря 2022 г. Принята к публикации 28 декабря 2022 г.

Установление и демонстрация метрологической прослеживаемости результатов измерений к эталону соответствующей единицы физической величины является одной из основных задач испытательных лабораторий. При определении химического состава матричных материалов, как правило, определяют массовую долю элемента (компонента). Рассмотрены алгоритмы расчета результатов физико-химических измерений (на примере отдельных методов) с точки зрения метрологической прослеживаемости. Показано, что результаты определения массовой доли элементов прослеживаются к эталону единицы массы системы SI «килограмм». Средства измерений, прошедшие поверку, не всегда удовлетворяют требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025 по метрологической прослеживаемости. У значительной части универсальных индивидуально градуируемых аналитических приборов нормируемые метрологические характеристики лишь косвенно связаны с неопределенностью измерений, выполняемых с помощью этих приборов. Определенные трудности вызывает необходимость подтверждения метрологической прослеживаемости значений сертифицированных стандартных образцов. Рассмотрены варианты заявлений о метрологической прослеживаемости, представленные в сертификатах зарубежных стандартных образцов. Приведена формулировка заявления о прослеживаемости аттестованных характеристик сертифицированных стандартных образцов, производимых ЗАО «ИСО».

Ключевые слова: метрологическая прослеживаемость; международная система единиц; моль; сертифицированный стандартный образец; ССО; постоянная Авогадро; килограмм; средство измерения; поверка; калибровка.

METROLOGICAL TRACEABILITY OF MATRIX REFERENCE MATERIALS

© **Valerii V. Stepanovskikh*, Rashida K. Khuzagaleeva, Elena K. Kolpakova**

The Institute for Certified Reference Materials, 13-a, Ul'yanovskaya ul., Yekaterinburg, 620057, Russia; *e-mail: iso@icrm-ekb.ru

Received December 12, 2022. Revised December 22, 2022. Accepted December 28, 2022.

Establishment and demonstration of the metrological traceability of measurement results is one of the main goals of testing laboratories. In physicochemical measurements, the problem of establishing metrological traceability is still far from being solved and is very relevant. One of the basic principles of quantitative chemical analysis, as well as other types of measurements, is to ensure the traceability to the "standard" of the corresponding unit of physical quantity, but the unit of quantity of a substance "mole" does not have a standard. At the same time, the amount of a chemical element or stoichiometric compound in moles can be expressed in the units of mass — kilogram, and vice versa, the mass of any element or stoichiometric compound can be expressed in moles, using standard reference data on the atomic weight of chemical elements and their isotopes. When determining the chemical composition of matrix materials, as a rule, the mass fraction of the analyzed element (component) is determined. Algorithms for calculating the results of physical and chemical measurements are considered from the viewpoint of the metrological traceability using the example of individual methods. It is shown that the results of measurements of the mass fraction of elements can be traced to the standard unit of mass of SI system "kilogram." Measuring instruments that have been verified do not always meet the requirements of GOST ISO/IEC 17025 for metrological traceability. For a significant part of universal individually calibrated analytical instruments, the normalized metrological characteristics indicate only their capabilities and are only indirectly related to the uncertainty of measurements performed using these instruments. Certain difficulties are attributed to the necessity of confirming the metrological traceability of the values of certified reference materials. The variants of statements on metrological traceability presented in the certificates of foreign manufacturers of certified reference materials are considered. In conclusion, the authors provide a

statement on the traceability of the certified characteristics of certified reference materials produced by ICRM.

Keywords: metrological traceability; international system of units; mole; certified reference material; CRM; Avogadro constant; kilogram; measuring instrument; verification; calibration.

Введение

Число публикаций о метрологической прослеживаемости постоянно растет. В ГОСТ ISO/IEC 17025[1] сделан четкий акцент на обеспечении метрологической прослеживаемости результатов, получаемых лабораторией. В аналитических измерениях ввиду сложности и многообразия объектов анализа задача установления метрологической прослеживаемости еще далека от своего решения и является весьма актуальной. В то же время, применяемые методики количественного химического анализа всегда были основаны на законах классической химии, применении чистых веществ и стехиометрических соединений, химических константах и стандартных справочных данных. Это позволяло и раньше, и в настоящее время получать согласованные результаты в разных аналитических лабораториях несмотря на отсутствие эталона единицы количества вещества международной системы SI «моль». В своей статье Майкл Томпсон [1] пишет:

«Надежная метрологическая инфраструктура химических измерений является требованием универсальной сопоставимости результатов, используемых в международной торговле.

За последние несколько десятилетий такая система была введена в действие, и налицо соответствующее улучшение качества. Но чрезмерный упор на прослеживаемость и особый подход к неопределенности теперь стали контрпродуктивными. Вместо того, чтобы привести к дальнейшему улучшению качества аналитических результатов, эти широко распространенные принципы отвлекли химиков-аналитиков от реальных проблем, и прогресс остановился».

«Общая проблема для химиков-аналитиков связана с различными нюансами, связанными со словом «прослеживаемость». В повседневном смысле это просто означает, что мы проводим все измерения в терминах (обычно) единиц SI и соответствующим образом выражаем результаты».

Международными стандартами введены понятия, относящиеся к прослеживаемости результатов измерений: установление метрологической прослеживаемости; демонстрация метрологической прослеживаемости; верификация прослеживаемости.

Обеспечение соответствия результатов аналитических лабораторий современным требованиям в части метрологической прослеживаемости представляется целесообразным.

Метрологическая прослеживаемость определена в международном словаре по метрологии (VIM) [2] как «свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерения».

Определение понятия «основа для сравнения» требует уточнения. Под «эталоном» следует понимать эталон единицы величины. Сертифицированный стандартный образец (ССО) — это образец, сопровождаемый сертификатом (паспортом), одна или несколько характеристик которого установлены по процедуре, связывающей их с точной реализацией соответствующей единицы измерения, при этом в сертификате имеется заявление о метрологической прослеживаемости к национальным или международным эталонам и указана неопределенность [3]. В случае применения для калибровки (градуировки) чистых металлов, стехиометрических соединений применяют массу этого вещества и используют (при необходимости) стандартные справочные данные об атомном весе химических элементов и их изотопов.

Будут ли лаборатории получать согласованные результаты при использовании разных основ для сравнения? К какой единице Международной системы SI прослеживаются разные основы для сравнения? Это ключевые вопросы для установления и демонстрации метрологической прослеживаемости.

Данная статья является попыткой ответить на эти вопросы на примере определения состава матричных материалов (сырья и продукции черной металлургии), в том числе, сертифицированных стандартных образцов, различными физико-химическими методами.

Одним из базовых принципов количественного химического анализа, как и других видов измерений, является обеспечение прослеживаемости к эталону соответствующей единицы физической величины. Единица количества вещества «моль» не имеет своего эталона [4].

В Международной системе SI (2019 г.) [5] моль определен так: один моль содержит точно

[1] ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 (ISO/IEC 17025:2017, IDT). Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

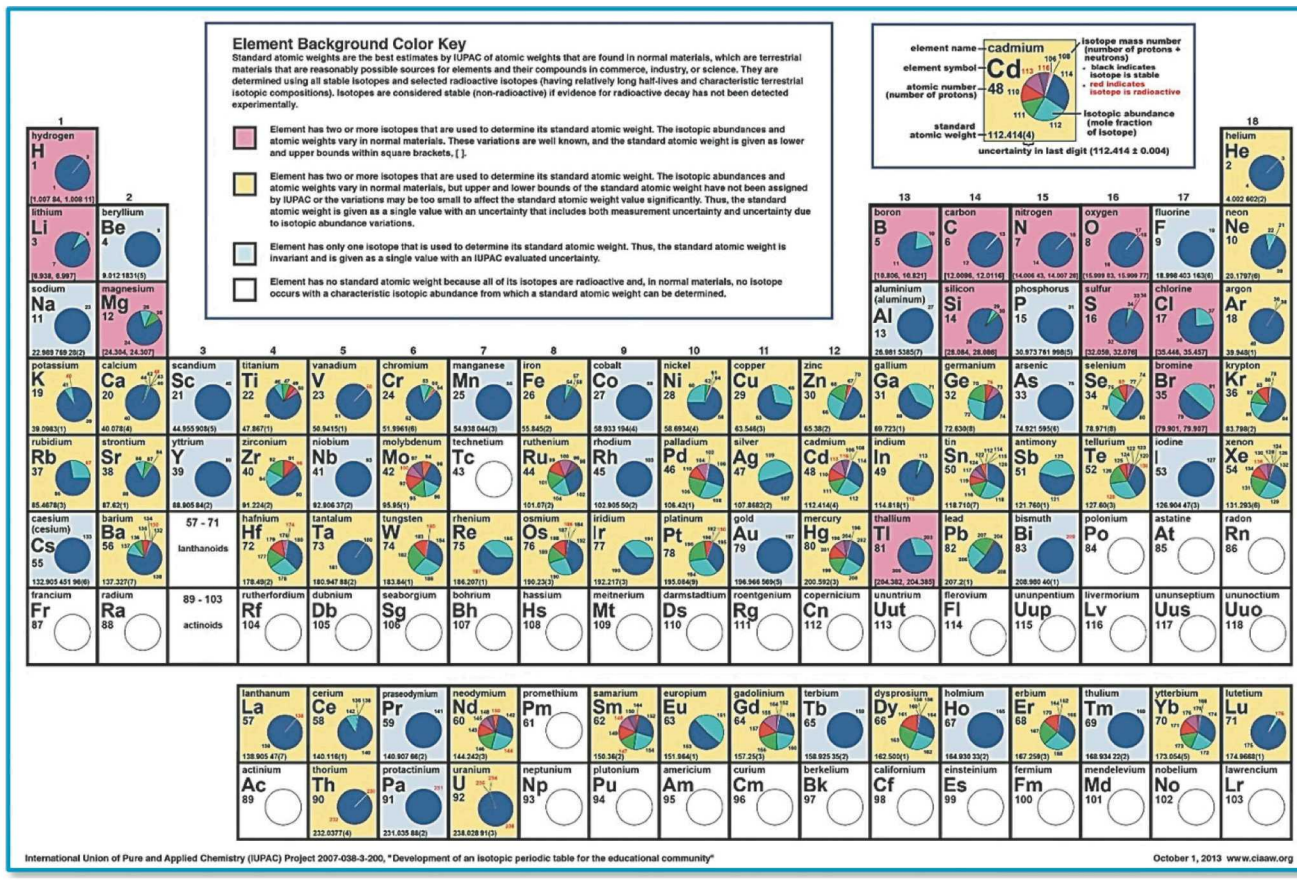

Рис. 1. Периодическая таблица элементов и изотопов IUPAC

Fig. 1. IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes

$6{,}02214076 \cdot 10^{23}$ структурных элементов. Это число — фиксированное числовое значение постоянной Авогадро (N_A, число Авогадро). Структурными элементами могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны и любые другие частицы или определенные группы частиц.

Нет возможности иметь единый эталон единицы величины «моль», учитывая все многообразие химических элементов и их соединений.

Количество химического элемента или стехиометрического соединения в молях может быть выражено в единицах массы — килограммах, и наоборот, масса любого элемента или стехиометрического соединения может быть выражена в молях, если использовать справочные данные о значениях атомных весов элементов.

Наиболее точные и согласованные данные об атомных весах элементов и их изотопов приведены в техническом отчете Комиссии по содержанию изотопов и атомным весам IUPAC [6]. Периодическая таблица изотопов IUPAC приведена на рис. 1. Любая лаборатория может иметь в своем распоряжении моль соответствующего элемента или химического соединения, проведя вычисления и взяв соответствующую массу вещества.

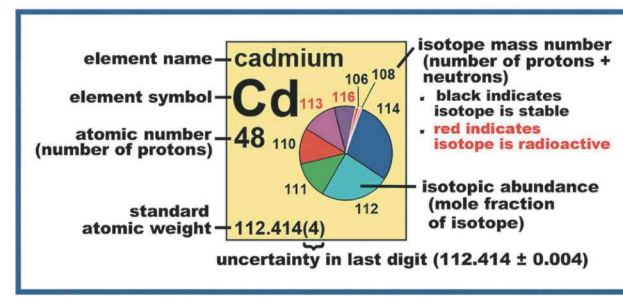

Рис. 2. Расшифровка данных, приведенных в Периодической таблице UIPAC

Fig. 2. Interpretation of the data given in the UIPAC Periodic Table

Состав данных в Периодической таблице изотопов IUPAC представлен на рис. 2. Здесь для каждого элемента приведена информация по его изотопам (включая радиоактивные), их доля и стандартный атомный вес элемента с указанием расширенной неопределенности.

В таблице представлен фрагмент данных, приведенных в техническом отчете IUPAC «Стандартные атомные веса 2021» (Standard atomic weights of the elements 2021) [6].

Метрологическая прослеживаемость методов, применяемых в аналитических лабораториях

При проведении анализа матричных материалов, как правило, определяют массовую долю элемента (компонента).

Методы, основанные на принципах стехиометрии: гравиметрия, титриметрия, кулонометрия и др. В этом случае для проведения расчетов необходимо наличие эталона количества вещества, выраженного в единицах SI «моль».

Например, при определении серы гравиметрическим методом в соответствии со стандартной методикой после растворения навески пробы M серу выделяют, осаждают и взвешивают в виде сульфата бария. Измеренное значение массы $BaSO_4$ прослеживается до единицы SI «килограмм». Поскольку необходимо определить массовую долю серы в анализируемой пробе, воспользуемся таблицей атомных весов.

Один моль $BaSO_4$, равный 233,383 г, содержит один моль серы (32,06 г), отсюда фактор пересчета массы сульфата бария (m_{BaSO_4}) в массу серы (m_S) составит 0,1374. Если массу навески обозначить M, получим следующую формулу расчета массовой доли серы в пробе:

$$X = \frac{m_{BaSO_4} \cdot 0{,}137 \cdot 100\ \%}{M}.$$

Для получения результата анализа проведены только измерения масс (массы пробы M и массы осадка сульфата бария m_{BaSO_4}), поэтому результат прослеживается до единицы массы системы SI «килограмм».

Стандартные атомные веса, приведенные в техническом отчете IUPAC 2021 г.

Standard atomic weights given in the IUPAC technical report 2021

Z	Symbol	Element	Standard Atomic Weight	Notes
...	...	...	...	...
22	Ti	titanium	47.867 (1)	
23	V	vanadium	50.9415(1)	
24	Cr	chromium	51.9961(6)	
25	Mn	manganese	54.938043(2)	
26	Fe	iron	55.845(2)	
...	...	...	...	...

Аналогичные рассуждения можно провести для титриметрии, однако в этом случае расчеты проводят на основе стехиометрической реакции, рассчитывая количество аналита по измеренному объему раствора титранта. Например, при определении общего железа в железорудном сырье проводят титрование ионов Fe (II) раствором бихромата калия:

$$6Fe^{2+} + Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ \rightarrow 6Fe^{3+} + 2Cr^{3+} + 7H_2O.$$

1 моль Fe = 55,845 ± 0,002 г (6 моль — 335,070 г), 1 моль $K_2Cr_2O_7$ = 294,1888 ± 0,0007 г, фактор F пересчета массы $K_2Cr_2O_7$ составит 1,1390.

Результат измерения прослеживается к массе навески $K_2Cr_2O_7$, взятой для приготовления раствора, и массе бихромата, вычисленной из объема этого раствора, пошедшего на титрование с учетом фактора пересчета F. В расчетах учитывают результат холостого опыта. Из этого следует, что результат измерений прослеживается до единицы массы системы SI «килограмм».

Наиболее значимым фактором анализа является алгоритм его проведения, основанный на законах классической химии и обеспечивающий переведение определяемого элемента в соответствующую определяемую форму. В первом примере это получение осадка сульфата бария, не содержащего примесей, но включающего все количество серы, а во втором — переведение всего количества железа в ионы Fe^{2+}.

Исследования метрологической основы методов количественного анализа, базирующихся на данных классической химии, проводились Н. П. Комарем в 80-х годах прошлого века на кафедре химической метрологии Харьковского государственного университета. Автором рассмотрено новое направление современной аналитической химии — химическая метрология, наука об измерениях химической формы движения материи, основанная на строгом учете физико-химических и метрологических закономерностей [7].

Физико-химические методы (фотометрия, атомно-абсорбционная спектрометрия, атомно-эмиссионная спектрометрия с ИСП и др.) основаны, как правило, на применении градуировочной зависимости измеряемого аналитического сигнала от массы (концентрации) аналита. Для построения градуировочных зависимостей непосредственно перед анализом используют растворы с точно установленной концентрацией, приготовленные растворением навески чистого металла или стехиометрического соединения в определенном объеме.

Результатом этих измерений также является масса m элемента в навеске пробы M, например, фотометрический анализ основан на линейной

зависимости оптической плотности раствора A от концентрации поглощающего вещества:

$$A = \varepsilon l C,$$

где ε — молярный коэффициент поглощения (величина, постоянная для конкретного химического соединения); l — толщина поглощающего слоя раствора (толщина кюветы); C — концентрация анализируемого раствора.

Перед анализом строят градуировочный график в координатах $A = f(C)$, применяя стандартные растворы, приготовленные из чистых веществ, стехиометрических соединений или ССО. Измеряют оптическую плотность раствора анализируемой пробы массой M, приготовленного в соответствии с методикой измерений, находят по графику значение массы m определяемого элемента в навеске пробы M и вычисляют значение массовой доли. Полученный результат прослеживается до единицы массы системы SI «килограмм».

Аналогичный алгоритм проведения измерений в части построения и использования градуировочного графика применяют и в других физико-химических и физических методах анализа.

Роль поверки аналитических приборов в обеспечении метрологической прослеживаемости результатов измерений

В России сложилось мнение, что средства измерений (СИ), прошедшие поверку, должны рассматриваться как удовлетворяющие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025 по метрологической прослеживаемости. Это не так. Материалы, подтверждающие поверку (запись в Федеральном информационном фонде «АРШИН», свидетельство о поверке, протокол поверки), иногда не содержат ряда сведений, представление которых для сертификата калибровки является обязательным [8]. Возникает законный вопрос: необходима ли такая поверка?

Значительная часть аналитических приборов относится к приборам универсального назначения, их нормируемые метрологические характеристики указывают на возможности приборов и лишь косвенно связаны с неопределенностью измерений, выполняемых с помощью этих приборов [9]. Особенности метрологического обеспечения таких приборов были учтены в РД 50-674–88[2]: в этих методических указаниях было предусмотрено, что поверка таких приборов может осуществляться «путем проведения регламентированных в методиках КХА... процедур контроля точности результатов».

В развитие положений, изложенных в РД 50-674–88, Госстандартом СССР было вышущено письмо от 31.03.89 № 10/51-286 «Об аттестации и поверке аналитических приборов универсального назначения и стеклянных мер вместимости», в котором, в частности, было указано: «Поверка стандартизованных средств измерений химического состава и мер вместимости стеклянных, находящихся в эксплуатации и не подлежащих обязательной государственной поверке по ГОСТ 8.513–84, а также нестандартизованных аналитических приборов[3] и аналитических комплексов универсального назначения при их эксплуатации осуществляется путем проведения регламентированных в методиках КХА, предусматривающих их использование, процедур оперативного контроля точности результатов КХА (на основе применения СО). При выполнении нормативов оперативного контроля средства измерений считаются соответствующими метрологическим требованиям и поверке по ГОСТ 8.513 не подлежат».

Приходится выразить сожаление, что данная практика не нашла своего развития в дальнейшем, а РД 50-684–88 был отменен в рамках «регуляторной гильотины».

В настоящее время все аналитические приборы универсального назначения проходят испытания и поверку. Рассмотрение существующих методик поверки таких приборов позволяет выразить сомнение в ее целесообразности, поскольку их нельзя использовать без соответствующей методики измерений, в которой предусмотрен алгоритм проведения анализа, включая градуировку и оперативный контроль точности.

Практика применения поверочных схем для аналитических приборов универсального назначения при поверке не дает оснований для однозначно положительной оценки.

Метрологическая прослеживаемость сертифицированных значений стандартных образцов

Заявление о метрологической прослеживаемости. Международный стандарт ISO 17034: 2016 [10] требует, чтобы сертификат стандартного образца содержал заявление о метрологической прослеживаемости сертифицированных значений, но не оговаривает формат таких заявлений.

[2] РД 50-674–88. Методические указания. Метрологическое обеспечение количественного химического анализа. Основные положения. — Утв. постановлением Госстандарта № 3164 от 16.09.1988.

[3] Нестандартизованные средства измерений проходили метрологическую аттестацию по ГОСТ 8.236–89 «ГСИ. Метрологическая аттестация средств измерений». С 01.12.2001 стандарт был отменен на территории Российской Федерации.

В соответствии с ГОСТ ISO Guide 30–2019[4] в паспорте ССО должно быть приведено утверждение о метрологической прослеживаемости.

Установление значений массовой доли элементов в ССО матричных материалов проводят, как правило, на основе результатов межлабораторного эксперимента с использованием различных методик измерений в различных лабораториях. При этом лаборатории используют аналитические методы по своему выбору. Сравнение данных становится возможным, поскольку получаемые результаты прослеживаются к эталону единицы массы системы SI «килограмм». Межлабораторная и «межметодическая» характеризация базируется на усреднении по различным источникам смещения для того, чтобы достичь снижения неопределенности. При этом повышается надежность приписанного значения ССО.

Обсуждения формулировки заявления (утверждения) о прослеживаемости продолжаются более 10 лет [11 – 13] и пока не увенчались разработкой единого подхода. Ниже приведены отдельные примеры формулировок из сертификатов на ССО.

The Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM). Сертификат анализа ERM® — CD200 Морские водоросли (цитируется из [12]). Методы, использованные в межлабораторном сличении, включали: атомно-абсорбционную спектрометрию с использованием холодного пара, с электротермической атомизацией, атомизацией в пламени, с генерацией гидридов; атомно-эмиссионную спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой; масс- спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометров с секторным полем и квадрупольных в сочетании с изотопным разбавлением; нейтронно-активационный анализ.

Предполагается, что в этих условиях смещения, зависящие от конкретного метода, значительно уменьшаются или полностью исключаются. При надлежащей калибровке, т.е. прослеживаемости всего оборудования, приписанные значения напрямую прослеживаемы к единице Системы SI «килограмм».

The Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Certified European Reference Material EURONORM-CRM No. 591-2 (Ferrovanadium FeV80). Приписанные значения для этого материала получены путем межлабораторной характеризации, при этом каждая лаборатория использовала метод по своему выбору: стехиометрические аналитические методы либо методы, калиброванные по чистым металлам или стехиометрическим соединениям. Большинство используемых методов являются международными или национальными стандартными методами или технически им эквивалентны.

MBH analytical limited[5]. Certified Reference Material 36X CN1 (batch P) — медно-никелевый сплав. Большая часть аналитических работ по оценке этого образца была выполнена лабораториями с подтвержденной компетентностью, о чем свидетельствует их аккредитация по ISO/IEC 17025 [14]. Неявным требованием для этой аккредитации является выполнение анализа с должной прослеживаемостью посредством непрерывной цепи сравнений (каждое — с установленной неопределенностью) с первичными стандартами, такими, как моль, или со стандартными образцами, признанными на национальном или международном уровне. Кроме того, некоторые результаты, полученные в рамках этой программы тестирования, прослеживаются до стандартов NIST в рамках аналитической калибровки или контроля процесса.

ЗАО «Институт стандартных образцов» (ЗАО «ИСО»). Авторами предложена следующая формулировка заявления о прослеживаемости аттестованных характеристик ССО, производимых ЗАО «ИСО».

Аттестованные значения массовой доли компонентов установлены путем межлабораторной аттестации; результаты измерений массовой доли компонентов получены с применением поверенных (калиброванных) средств измерений, методик измерений, основанных на принципах стехиометрии либо градуировках (калибровках) с применением чистых металлов и/или стехиометрических соединений и/или сертифицированных стандартных образцов, в том числе, стандартных образцов утвержденного типа; аттестованные значения массовой доли компонентов прослеживаются к единице Международной системы единиц (SI) «килограмм».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Thompson M.** A new focus for quality in chemical measurement / Anal. Methods. 2014. Vol. 6. N 21. P. 8454 – 8459. DOI: 10.1039/C4AY01496K
2. ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology. — Basic and general concepts and associated terms (VIM). https://www.iso.org/standard/30239.html (дата обращения 12.12.2022).
3. Метрологическая прослеживаемость в химических измерениях / Под ред. В. Б. Барановской, И. В. Болдырева. — М.: Техносфера, 2022. — 106 с.
4. **Карпов Ю. А., Филиппов М. Н., Барановская В. Б.** Решенные и нерешенные проблемы метрологии химического анализа / Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74. № 9. С. 643 – 651. DOI: 10.1134/S0044450219090056

[4] ГОСТ ISO Guide 30–2019. Стандартные образцы. Некоторые термины и определения.

[5] MBH в 2019 г. объединилась с ARMI (Analytical Reference Materials International) как ARMI | MBH и вошла в состав LGC Standards (https://www.armi.com/en/mbh-now-armi-mbh).

5. Международная система единиц (SI), издание 9-е, 2019. https://www.vniim.ru/files/SI-2019.pdf (дата обращения 12.12.2022).
6. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2022. Vol. 94. N 5. P. 573 – 600. DOI: 10.1515/pac-2019-0603
7. **Комарь Н. П.** Химическая метрология. Гомогенные ионные равновесия. — Харьков: Высшая школа, 1983. — 208 с.
8. Политика Органа по аккредитации ААЦ «Аналитика» по обеспечению метрологической прослеживаемости результатов измерений. — М., 2022. https://aac-analitica.ru/files/237/politika-po-proslezhivaemosti- 5-redakcziya.pdf (дата обращения 12.12.2022).
9. **Нежиховский Г. Р.** Размышления в связи с отменой одного руководящего документа / Контроль качества продукции. 2020. № 4. С. 10 – 14.
10. ISO 17034:2016. General requirements for the competence of reference material producers. https://www.iso.org/standard/29357.html (дата обращения 12.12.2022).
11. **Koeber R., Linsinger T. P. J., Emons H.** An approach for more precise statements of metrological traceability on reference material certificates / Accredit. Qual. Assur. 2010. Vol. 15. N 4. P. 255 – 262. DOI: 10.1007/s00769-010-0644-2
12. ISO/TR 16476:2016. Reference materials. Establishing and expressing metrological traceability of quantity values assigned to reference materials. https://www.iso.org/standard/56654.html (дата обращения 12.12.2022).
13. **Sargent M.** The provision and use of traceability statements for reference materials / Accred. Qual. Assur. 2020. Vol. 25. N 5 – 6. P. 367 – 372. DOI: 10.1007/s00769-020-01450-8
14. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. https://www.iso.org/standard/45324.html (дата обращения 12.12.2022).

REFERENCES

1. **Thompson M.** A new focus for quality in chemical measurement / Anal. Methods. 2014. Vol. 6. N 21. P. 8454 – 8459. DOI: 10.1039/C4AY01496K
2. ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology. — Basic and general concepts and associated terms (VIM). https://www.iso.org/standard/30239.html (accessed December 12, 2022).
3. **Baranovskaya V. B., Boldyrev I. V.** (eds.). Metrological traceability in chemical measurements. — Moscow: Tekhnosfera, 2022. — 106 p. [in Russian].
4. **Karpov Yu. A., Filippov M. V., Baranovskaya V. B.** Solved and unsolved problems of the metrology of chemical analysis / J. Anal. Chem. 2019. Vol. 74. N 9. P. 839 – 846. DOI: 10.1134/S1061934819090053
5. International system of units (SI). 9th Edition, 2019. https://www.vniim.ru/files/SI-2019.pdf (accessed December 12, 2022) [in Russian].
6. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2022. Vol. 94. N 5. P. 573 – 600. DOI: 10.1515/pac-2019-0603
7. **Komar' N. P.** Chemical metrology. Homogeneous ionic equilibria. — Khar'kov: Vysshaya shkola, 1983. — 208 p. [in Russian].
8. AAC "Analytica" — accreditation policy to ensure the traceability of measurement results. — Moscow, 2022. https://aac-analitica.ru/files/237/politika-po-proslezhivaemosti-5-redakcziya. pdf (accessed December 12, 2022) [in Russian].
9. **Nezhikhovsky G. R.** Reflections of the cancellation of a guidance document / Kontrol' Kach. Prod. 2020. N 4. P. 10 – 14 [in Russian].
10. ISO 17034:2016. General requirements for the competence of reference material producers. https://www.iso.org/standard/29357.html (accessed December 12, 2022).
11. **Koeber R., Linsinger T. P. J., Emons H.** An approach for more precise statements of metrological traceability on reference material certificates / Accredit. Qual. Assur. 2010. Vol. 15. N 4. P. 255 – 262. DOI: 10.1007/s00769-010-0644-2
12. ISO/TR 16476:2016. Reference materials. Establishing and expressing metrological traceability of quantity values assigned to reference materials. https://www.iso.org/standard/56654.html (accessed December 12, 2022).
13. **Sargent M.** The provision and use of traceability statements for reference materials / Accred. Qual. Assur. 2020. Vol. 25. N 5 – 6. P. 367 – 372. DOI: 10.1007/s00769-020-01450-8
14. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. https://www.iso.org/standard/45324.html (accessed December 12, 2022).