

«Безэталонный» рентгеноспектральный анализ: реальность или миф?

М. Н. Филиппов, д.ф.-м.н.¹

УДК 543.427.34

Статья основана на материале пленарного доклада автора на III Всероссийской конференции по аналитической спектроскопии. Поводом к ее написанию стало то обстоятельство, что автор в процессе рецензирования многих научных работ сталкивался с совершенно неприемлемыми результатами электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА), получаемого на современных приборах. Сегодня значительная часть электронных микроскопов оборудована энергодисперсионными рентгеновскими спектрометрами (ЭДС) с соответствующим математическим обеспечением. В результате этого возникает дополнительная возможность – проведение ЭЗМА исследуемого объекта. Руководства по использованию этих спектрометров предлагают достаточно простой и быстрый алгоритм проведения анализа обычно без использования каких-либо образцов сравнения (ОС). Такой подход получил название «безэталонный анализ» (БА). Обсуждается развитие БА и проблема правильности определений.

Ключевые слова: безэталонный анализ, электронно-зондовый микроанализ, энергодисперсионные рентгеновские спектрометры, электронный микроскоп

The article is based on the material of the author's plenary report at the III All-Russian Conference on Analytical Spectroscopy. The reason for its writing was the fact that the author, in the process of reviewing many scientific papers, came across completely unacceptable results of electron probe microanalysis (EPMA) obtained with modern instruments. Today, a significant part of electron microscopes is equipped with energy dispersive X-ray spectrometers (EDS) with appropriate mathematical software. As a result of this, an additional opportunity arises – conducting a EPMA the studied object. The manuals for using these spectrometers offer a fairly simple and fast analysis algorithm, usually without any reference samples (RS). This approach is called standardless analysis (SA). The development of SA and the problem of correct definitions are discussed.

Keywords: standardless analysis, electron probe microanalysis, energy dispersive X-ray spectrometers, electron microscope

Статья получена 03.04.2020

Принята к публикации 13.04.2020

Измерение аналитического сигнала в ЭЗМА (спектрометры с волновой дисперсией)

Первоначально в ЭЗМА использовали исключительно рентгеновские спектрометры с волновой

дисперсий (ВДС), в которых кристалл-анализатор механически перемещался по кругу Роуланда (рис. 1). Особенность таких спектрометров состоит в том, что условия регистрации разных аналитических линий отличаются друг от друга, причем эти отличия имеют как постоянную, так и зависящую от времени составляющую, что не позволяет учесть эти изменения путем соответствующей

¹ ИОНХ РАН, Москва, mn@filippov.org.ru.

калибровки [1]. По этой причине в качестве аналитического сигнала стали использовать отношение интенсивностей спектральных линий характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) определяемого элемента в исследуемом образце и в ОС:

$$k_i = I_i / I_i^{st}, \quad (1)$$

где I_i – интенсивность линии ХРИ рентгеновского излучения в исследуемом образце, I_i^{st} – интенсивность той же линии в ОС, измеренные при одинаковых условиях и через короткие промежутки времени.

В реальном эксперименте при установке спектрометра на линию определяемого элемента измеряют суммарную интенсивность ХРИ вместе с фоном (это, в основном, тормозное рентгеновское излучение), соответственно величины I_{i+B} и I_{i+B}^{st} . Величины фона для исследуемого образца и образца сравнения I_B , I_B^{st} , соответствующие положению линии ХРИ определяемого i -го элемента на длине волны λ_i , вычисляют, как правило, путем интерполяции экспериментально измеренных значений фона для исследуемого образца и ОС слева (I_{Bi}^-, I_{Bi}^{st-}) и справа от положения аналитической линии (I_{Bi}^+, I_{Bi}^{st+}), как показано на рис. 2. Величина k_i получила название k -отношения и функционально связана с содержаниями всех находящихся в анализируемом микрообъеме элементов:

$$k_i = f_i(c_1, c_2, \dots, c_N), \quad (2)$$

где c_1, c_2, \dots, c_N – содержания элементов в анализируемом микрообъеме, функции $f_i(c_1, c_2, \dots, c_N)$ описывают матричные эффекты для каждого элемента, N – число элементов в анализируемом микрообъеме. Если для всех N элементов может быть определено k -отношение, система (2) является полной. Описанный способ измерения аналитического сигнала будем далее называть протоколом с использованием экспериментальных значений k -отношений.

Построение градуировочной характеристики в ЭЗМА с ВДС

Для нахождения значений содержаний c_1, c_2, \dots, c_N должны быть установлены функции f_i , которые описывают матричные эффекты. Принятая в классическом спектральном анализе процедура экспериментального построения градуировочной характеристики с использованием близких по составу

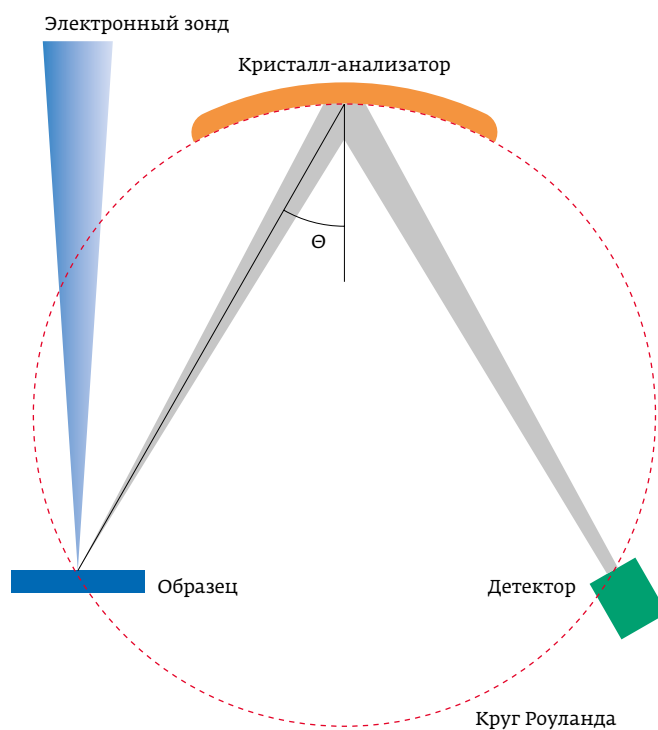


Рис. 1. Схема рентгеновского спектрометра с дисперсией по длине волны

ОС (адекватных ОС) оказалась неприменимой в случае ЭЗМА. С момента создания ЭЗМА в первой половине 50-х годов 20 века стало ясно, что в этом методе невозможно использовать адекватные ОС, поскольку многокомпонентные сплавы, напри-

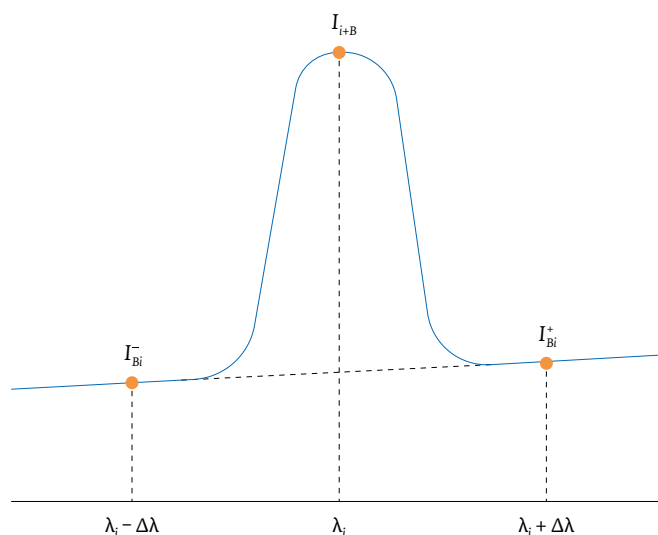


Рис. 2. Измерение суммарной интенсивности I_{i+B} и значений фона слева (I_{Bi}^-) и справа (I_{Bi}^+) от линии

мер, не обладают однородностью химического состава на микрометровых расстояниях [2]. Другая причина невозможности подбора адекватных ОС для ЭЗМА заключается в том, что до момента начала исследований нет достоверной информации даже о качественном составе анализируемого микрообъема. Поэтому было предложено использовать неадекватные ОС – чистые элементы, а для слишком химически активных и газообразных аналитов – простые химические соединения: KCl для K и Cl, MgO для O, BN для N и т. д., удовлетворяющие критерию однородности состава на микрометровом уровне. Применение этих образцов позволяет исключить из рассмотрения аппаратные факторы, но матричные эффекты, обусловленные различием условий генерации и распространения аналитического сигнала в исследуемом образце и ОС остаются некомпенсированными. Влияние матрицы было предложено учитывать расчетным путем на основе количественной теории взаимодействия электронов и рентгеновского излучения с твердым телом, развитие которой проходило с середины 50-х до начала 70-х годов 20 века. В результате в ЭЗМА, впервые в практике количественного химического анализа, были созданы способы расчетного построения градуировочной характеристики. Конкретные способы учета матричных эффектов получили название методов коррекции (ZAF-коррекция, фрZ-коррекция и др.), которые подробно описаны в руководствах по микроанализу [1, 3–5]. Основные матричные эффекты обусловлены следующими обстоятельствами. Длина пробега электронов в веществе зависит от состава (среднего атомного номера) образца. От среднего атомного номера образца зависит и число обратно рассеянных электронов с энергией, большей критического потенциала ионизации аналитической линии. В результате этого изменяется генерируемая интенсивность аналитического сигнала. Эти два явления обычно рассматривают совместно, и они определяют так называемый эффект атомного номера. Возникает также ослабление излучения аналитической линии внутри образца за счет поглощения, что приводит к уменьшению регистрируемой интенсивности (эффект поглощения). В ряде случаев ХРИ элемента В, присутствующего в анализируемом микрообъеме, может вызывать дополнительную фотоионизацию атомов определяемого элемента А, в результате чего интенсивность соответствующей линии увеличивается (эффект флуоресцентного возбуждения). Аналогичное явление может быть вызвано частью тормозного излучения с энергией, большей

потенциала возбуждения аналитической линии. Все перечисленные матричные эффекты могут быть учтены на основе физических моделей. Поскольку система (2) изначально содержит все неизвестные значения c_1, c_2, \dots, c_N , то ее решение находят итерационным путем [3]. Такой подход нельзя назвать методом внешнего стандарта в чистом виде, поскольку экспериментальные значения интенсивностей ОС используются для информации об условиях генерации аналитического сигнала данного элемента, а учет матричных эффектов зависит от адекватности теоретической модели и неопределенностей, использованных при расчете констант.

Правильность ЭЗМА с ВДС для массивных объектов

Объекты, толщина которых больше пробега электронов используемой энергии, далее будем называть массивными, в отличие от тонких, исследуемых в ЭЗМА с применением просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ).

На практике изучение бюджета неопределенности в ЭЗМА длительное время ограничивалось аппаратными составляющими: неопределенностью счета импульсов, неопределенностями, связанными со способом учета мертвого времени детекторов, дрейфом параметров спектрометра и т. п. (см., например, [5]). Эти исследования имели большое значение для оптимизации экспериментальных условий, улучшения прецизионности результатов. При этом во многих работах правильность результатов часто отождествляли с прецизионностью. Многие коммерческие программы расчета содержаний в качестве погрешности результата анализа выводили погрешность, обусловленную счетом импульсов. В меньшей степени исследовали составляющие, связанные с процедурой расчета содержаний. Прежде всего, необходимо отметить, что современное состояние теории взаимодействия электронов с веществом не позволяет с требуемой для количественного анализа точностью рассчитать характеристики всех процессов, определяющих матричные эффекты. Имеются также проблемы, связанные с погрешностями вводимых в расчет значений массовых коэффициентов ослабления, в особенности для ХРИ легких элементов. Значительные усилия, предпринятые для разработки программ коррекции, были направлены на введение в процедуры расчета эмпирических данных, результатов статистического моделирования (см., напр., [4–5]),

позволяющих скомпенсировать исходную неадекватность моделей. Проверка правильности ЭЗМА для случая определения локального состава является достаточно сложной задачей по указанной выше причине. Отдельную проблему, в особенности для определения легких элементов, представляет собой учет эффекта поглощения из-за значительных неопределенностей значений массовых коэффициентов ослабления.

В 1972 году было проведено исследование правильности определений в ЭЗМА с ВДС на 264 образцах известного состава, удовлетворяющих по однородности требованиям микроанализа [7]. Распределение расхождений определений характеризуется относительным стандартным отклонением 2,5%, относительная систематическая погрешность 95% определений находится в интервале $\pm 5\%$. Эти данные характеризуют правильность при ЭЗМА произвольного образца неизвестного состава. В определенных группах образцов, в частности в минералах, удается достигнуть относительной систематической погрешности в интервале $\pm 1\%$. Приведенные данные характеризуют ЭЗМА массивных образцов с использованием ВДС.

Одним из существенных ограничений такой схемы ЭЗМА было довольно значительное время проведения анализа: для определения N элементов с использованием протокола с экспериментальным измерением k -отношений требуется $6N$ измерений сигнала на образце и ОС, кроме того в процессе анализа необходимо использовать до N ОС.

ЭЗМА с энергодисперсионными спектрометрами

С конца 60-х годов в практику ЭЗМА стали внедряться полупроводниковые энергодисперсионные (ЭДС) спектрометры [3, 8]. Основное отличие этого типа спектрометров в том, что сразу регистрируется весь рентгеновский спектр образца. Это позволило в одинаковых условиях измерять интенсивность аналитических линий всех определяемых элементов, что существенно ускоряет и упрощает анализ. Первоначально препятствием к широкому использованию ЭДС в количественном анализе было достаточно низкое энергетическое разрешение (у первых серийных ЭДС около 160 эВ на линии $M\alpha_{1,2}$), маленький динамический диапазон, нестабильность энергетической шкалы. Однако со временем в результате прогресса в аппаратной реализации ЭДС (создание кремниевых дрейфовых детекторов (silicon drift detector (SDD)), развития математического

обеспечения, прежде всего алгоритмов деконволюции налагающихся линий, создания детекторов с более высокими рабочими температурами (переход от охлаждения жидким азотом к использованию элементов Пельтье) удалось решить многие из этих задач. Например, отсутствие необходимости охлаждения жидким азотом существенно упростило сопряжение ЭДС с колонной микроскопа или микроанализатора, в частности дало возможность одновременного использования нескольких детекторов. Повышение стабильности положения линий при разных нагрузках спектрометра в сочетании с новыми алгоритмами разделения позволяет фактически реализовать энергетическое разрешение в ЭДС/SDD на уровне ВДС [9]. При использовании измерительного протокола с экспериментально определяемыми k -отношениями правильность определений близка к случаю ВДС [14]: относительное расхождение для элементов, содержание которых в анализируемом микрообъеме более 10% в пределах $\pm 5\%$, включая элементы легче Na, $\pm 10\%$ для элементов, содержание которых от 1 до 10%, и $\pm 25\%$ для элементов с содержанием от 0,1 до 1%. Предел обнаружения для большинства элементов – 0,05% [9]. При этом доза облучения – на 1-2 порядка величины меньше. Приведенные данные показывают, что характеристики ЭЗМА с ЭДС/SDD близки к ЭЗМА с ВДС. Следует при этом учесть, что исследование в работе [14] проводилось с использованием специального программного обеспечения, позволяющего реализовать измерительный протокол с экспериментальным определением k -отношений. Большинство современных коммерческих ЭДС/SDD не содержат этот протокол в программах управления экспериментом, и пользователь простым путем его реализовать не может. Кроме того, при его реализации утрачиваются преимущества ЭДС, в частности, экспрессность (требуется $N+1$ измерений при определении N элементов). С самого начала использования ЭДС возникла идея создания совершенно другого подхода, получившего в отечественной литературе название «безэталонный анализ» (БА). Необходимо заметить, что в появлении этого термина есть некая неудачная филологическая составляющая, он является не слишком правильным переводом английского термина *standardless*. Английское *standard* имеет также значение «эталон», причем это значение далеко не основное. В нашей стране термин «эталон» – это в первую очередь метрологическое понятие: средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы

измерений. Все измерения, в том числе в химическом анализе, базируются на различных эталонах, без них невозможно обеспечение единства измерений. В этом смысле БА – то, чего не бывает. На самом деле речь идет об измерительной процедуре, в которой непосредственно в процессе измерений не используются какие-либо рабочие эталоны или ОС. Именно такая процедура и имеется реально ввиду под термином БА, когда речь идет об ЭЗМА. Поскольку термин стал широко распространенным, мы им будем пользоваться в статье с учетом сделанных уточнений.

Безэталонный ЭЗМА «из первых принципов»

Развитию идей БА в ЭЗМА в значительной степени способствовали отмеченные преимущества ЭДС. Существенного упрощения процедуры анализа можно достигнуть, если не производить измерения, связанные с определением I_i^{st} в выражении (1). Чтобы избежать этого, было использовано несколько подходов (рис. 3). Первую группу методов составляют так называемые методы БА «из первых принципов», в которых величину I_i^{st} вычисляют на основании теории взаимодействия электронного пучка с твердым телом, после чего определяют k -отношение с использованием измеренной интенсивности I_i . Затем полученные данные направляют в программу коррекции матричных эффектов. Поскольку рассчитанная интенсивность от ОС, как правило, отличается от экспериментальной, а сохраняется только пропорциональность для различных линий, обязательным является этап

нормировки к 100%. Примерно по такой схеме были реализованы разные варианты БА массивных образцов «из первых принципов» [10, 11]. Различие между ними заключается в используемых моделях генерации рентгеновского излучения. Преимущества такого подхода состоят в уникальной экспрессности: примерно за 100 с возможно определение десятка элементов, при этом нет необходимости измерять сигналы от ОС. Проверка правильности такого подхода довольно сложна по изложенным ранее причинам. Корректно она была выполнена лишь в 1995 году в Национальном институте стандартов и технологий (США) на 238 образцах, включающих аттестованные стандартные образцы состава, бинарные соединения PbSe, InP, GaTe, PbTe, GaP, FeS, ZnS, CuS, GaAs, CdTe, HgTe, KCl, KBr, KI, стекла с аттестованным составом и др. [12]. Результат оказался ошеломляющим: относительное расхождение результатов определений состава массивных образцов в ЭЗМА с использованием метода БА «из первых принципов», лежит в интервале от -90 до +150%. 95% результатов имеют относительное расхождение в пределах $\pm 50\%$. Такого рода анализ может считаться только полуколичественным.

Причины таких значительных расхождений в полной мере не ясны до настоящего времени. Дело в том, что алгоритмы коррекции матричных эффектов используют те же самые уравнения, но отличие состоит в том, что в них введено много эмпирических поправок, компенсирующих неадекватность моделей. К другим причинам расхождений можно отнести то, что в подобных расчетах используют больше параметров, чем в системах

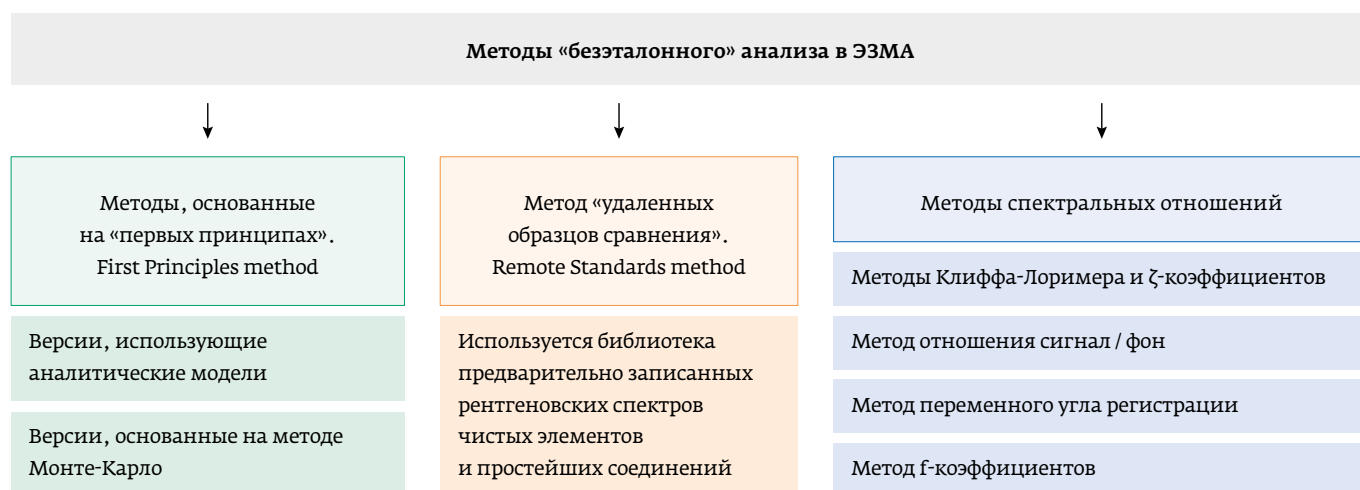


Рис. 3. Различные методы БА, используемые в ЭЗМА

коррекции данных: сечения ионизации внутренних оболочек, множество материальных констант и др. Быстрого прогресса в этой области ожидать не приходится. Интересно, что в случае тонких образцов широко используемый в ПЭМ метод Клифа-Лоримера [13], который может быть отнесен к БА «из первых принципов», дает существенно меньшие погрешности, по крайней мере в исследованных случаях на бинарных образцах. Это может быть связано с меньшим количеством используемых констант, а также с большей адекватностью физических моделей при сравнительно высоких энергиях электронов, применяемых в ПЭМ.

Безэталонный ЭЗМА с «удаленными ОС»

Широкое распространение в ЭЗМА получили иные схемы БА – методы с использованием «удаленных ОС» [14]. В этом подходе для вычисления k -отношений используют базу данных спектров ОС, записанную заранее в идеале на том же ЭДС-спектрометре, с помощью которого проводят анализ. Преимущества такой схемы состоят в том, что не требуется знание многих констант, нет зависимости от выбранной модели генерации, аппаратная функция спектрометра учитывается автоматически. Блок-схема расчета содержаний для этого варианта БА показана на рис. 4.

Исчерпывающей информации о правильности различных реализаций БА с «удаленными ОС» нет. Результаты предварительных исследований на коммерческих ЭДС показаны на рис. 5 [15]. Относительное расхождение 95% результатов лежит в интервале $\pm 30\%$. Это существенно лучше, чем на момент 1995 года [12]. Такие системы получили очень широкое распространение, однако производители не снабжают ЭДС какой-либо разумной информацией относительно правильности анализа. При этом, согласно [15], за последние 20 лет 95% количественных результатов, получаемых с помощью ЭДС, выполняется исключительно по схеме БА. Можно сказать, что в ЭЗМА/ЭДС победила «идеология одной кнопки». Однако такой анализ не является



Рис. 4. Программа расчета содержаний с использованием «удаленных ОС»

количественным, при таких погрешностях БА часто невозможно определить формулу соединения.

Попытки исследования источников возникающих погрешностей при БА с использованием коммерческих спектрометров предпринимались неоднократно (см., например, [16]). Поскольку фирменное программное обеспечение

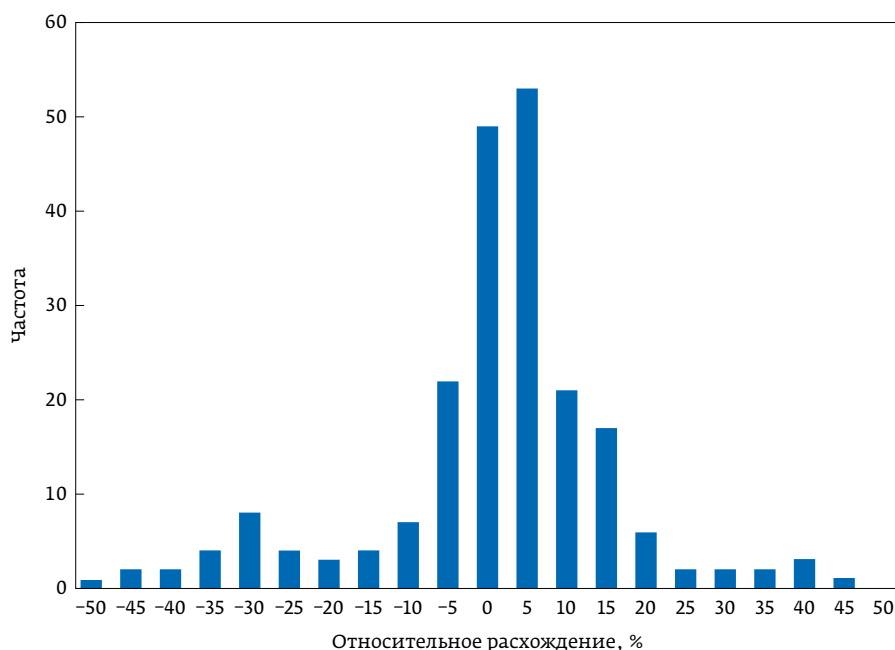


Рис. 5. Распределения относительных расхождений результатов БА, полученные на ЭДС спектрометрах различных производителей [15]

закрытое, то речь идет о тестировании «черного ящика». Установлено, что вероятными источниками погрешностей являются влияние рельефа образца, ошибки автоматической идентификации линий ХРИ, неадекватность используемой модели и неопределенности вводимых констант. Применение в отдельных случаях неоправданной нормировки результатов на 100% создает ложное представление о точностных характеристиках анализа. Получается, что развитие аппаратуры и математического обеспечения сыграло с аналитиками злую шутку – анализ из количественного превратился в полуколичественный.

В то же время возврат современных ЭДС к протоколу с экспериментальным определением *k*-отношений представляется нереалистичным. Дальнейшее развитие ЭЗМА/ЭДС несомненно будет связано с БА. Одно из существенных препятствий сегодня – закрытость программного обеспечения коммерческих спектрометров. Это лишает аналитика возможности проведения исследования полного бюджета неопределенностей. Совершенно справедливо отмечается по этому поводу в [15]: «Эти недостатки заставляют задуматься, в какой степени научная деятельность может быть основана на программном обеспечении „черного ящика“, которое никогда не оценивалось независимой третьей стороной для подтверждения его надежности».

Заключение.

Безэталонный анализ – это реальность или миф?

Несмотря на отмеченные трудности, в перспективе ЭДС/ЭЗМА будет развиваться по схеме БА. Использование ЭДС/SDD с современным программным обеспечением позволяет получить при использовании протокола с экспериментальным определением *k*-отношений метрологические характеристики на уровне ВДС. Это означает, что принципиальных ограничений для улучшения метрологических характеристик БА в ЭЗМА нет. Вероятнее всего дальнейший прогресс будет связан с развитием варианта с «удаленными ОС». Необходимым условием существенного улучшения метрологических характеристик является открытость программного обеспечения. С учетом специфики метода должны быть пересмотрены и способы аттестации соответствующих методик анализа. Одно из направлений развития возможно будет связано с расширением и усложнением базы «удаленных ОС», например, включением большего количества экспериментальных данных (разные

энергии зонда, различные геометрические условия и т. п.). На сегодняшний день количественный БА массивных образцов в ЭЗМА – это миф, но который в перспективе может стать реальностью.

Литература / References

1. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ. М.: Мир. 1979. 424 с.
Reed S. Electron probe microanalysis. Moscow, Mir Publ., 1979. 424 p. (In Russ.).
2. Castaing R. (1951), Application des sondes électroniques à une méthode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique. Thèse de doctorat d'état, Université de Paris, 1952, Publication ONERA N. 55.
3. Количественный электронно-зондовый микроанализ / Под ред. В. Скотта и Г. Лава. М.: Мир, 1986. 352 с.
Quantitative electron probe microanalysis. Ed. W. Scott and G. Lava. Moscow, Mir Publ., 1986. 352 p. (In Russ.).
4. Pouchou J-L., Pichoir F. Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model "PAP". In: Electron probe quantitation. Ed. by K.F.J. Heinrich and Dale E. Newbury. New York. Springer Science+Business Media. 1991. P. 31-75.
5. Scott V. D., Love G. An EPMA correction method based upon quadrilateral ρZ -profile. In: Electron probe quantitation. Ed. by K.F.J. Heinrich and Dale E. Newbury. New York. Springer Science+Business Media. 1991. P. 19-30.
6. Ziebold T. O. Precision and sensitivity in electron probe microanalysis // Analytical Chemistry. 1967. V. 39. No 8. P. 858. DOI: 10.1021/ac60252a028. Marinenko R. B. and Leigh S. / Uncertainties in electron probe microanalysis // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2010. V.7. P. 012017.
7. Yakowitz H. Methods of quantitative X-ray analysis / Practical scanning electron microscopy / Ed. by Goulstein J.T. and Yakowitz H. New York, London. Plenum Press, 1975. P. 338.
8. Newbury D. E., Ritchie N. W. M. Electron-excited X-ray microanalysis by energy dispersive spectrometry at 50: analytical accuracy, precision, trace sensitivity, and quantitative compositional mapping // Microsc Microanal. 2019. V. 25, Issue 5. P. 1075-1105. DOI: 10.1017/S143192761901482X.
9. Newbury D. E. and Ritchie N. W. M. Performing elemental microanalysis with high accuracy and high precision by scanning electron microscopy / silicon drift detector energy-dispersive X-ray spectrometry (SEM/SDD-EDS) // J. Mater. Sci. 2015. V. 50. P. 493. DOI: 10.1007/s10853-014-8685-2.
10. Nasir M. J. X-ray analysis without the need for standards // J. Microsc. 1976. V. 108. No 1. P. 79. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1976.tb01081.x.
11. Wernisch J. Quantitative electron microprobe analysis without standard samples. X-ray Spectrom. 1985. V. 14. No. 3. P. 109. DOI: 10.1002/xrs.1300140304.
12. Newbury D. E., Swyt C. R., Mylklebust R. L. «Standardsless» quantitative electron probe microanalysis with energy-dispersive X-ray spectrometry: is worth the risk? Anal. Chem. 1995. V. 67. No. 11. P. 1886. DOI: 10.1021/ac00107a017.
13. Cliff G., Lorimer G. W. The quantitative analysis of thin specimens // Journal of Microscopy. 1975. Vol. 103. Pt 2. P. 203-207. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1975.tb03895.x.
14. Trincavelli J., Limandri S., Bonetto R. Standardless quantification methods in electron probe microanalysis. Spectrochimica Acta Part B. 2014. V. 101. P. 76-85. DOI: 10.1016/j.sab.2014.07.016.
15. Ritchie N. W. M., Newbury D. E. Standardless analysis – better but still risky. Microsc. Microanal. 2014. V. 20 (Suppl 3). P. 696-697. DOI: 10.1017/S1431927614005200.
16. Newbury D. E. and Ritchie N. W. M. Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative? // Scanning. 2013. V. 35. No. 3. P. 141-148. DOI: 10.1002/sca.21041.

B I O D O T



ZX1010™

Платформа для дозирования

Это гибкая система дозирования с программируемой осью X, ручным регулированием положения оси Y и пневматической осью Z. Распределенные объемы программируются независимо через терминал.

ZX1010 предназначен для одновременного или последовательного дозирования по линиям и точкам. Платформа ZX1010 может быть настроена с 8 дозаторами BioJet, FrontLine, PolyDrop или 4 uAirJet, AirJet.



**Используется в сухой химии
или в растекание капли
жидкости в радиальном
направлении**

197376, Санкт-Петербург, улица Льва Толстого, дом 7,
литер А, помещение 5-н офис 20
Email: info@vetaline.ru
Тел: +7(812)984-18-03

VETALINE