

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АТОМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА «АТОМ»

© Виктор Геннадьевич Гаранин<sup>1</sup>, Олег Александрович Неклюдов<sup>1</sup>,  
Дмитрий Владимирович Петроченко<sup>1</sup>, Захар Владимирович  
Семёнов<sup>1,2</sup>, Степан Владимирович Панкратов<sup>1,2</sup>,  
Павел Владимирович Ващенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия; e-mail: oleg@vmk.ru

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

*Статья поступила 17 октября 2018 г. Поступила после доработки 28 октября 2018 г.  
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Программное обеспечение «Атом» входит в состав спектральных комплексов для атомно-эмиссионного и атомно-абсорбционного анализа производства компании «ВМК-Оптоэлектроника». Мотивом совершенствования программы являются разработка новых и улучшение существующих спектральных приборов, появление новых математических методов и алгоритмов обработки спектральной информации, а также пожелания пользователей приборов. Цель статьи — ознакомление специалистов с наиболее заметными изменениями в программе «Атом» за период 2017 – 2018 гг. Создана 64-битная версия программы «Атом», позволившая снять ограничение на объем регистрируемых последовательностей спектров и существенно ускорить их обработку за счет распараллеливания вычислений по ядрам процессора, что важно, например, в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии. Для реализации метода атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией и источником непрерывного спектра для одновременного определения элементов разработаны инструменты «Автоматический дозатор» и «Абсорбционный спектрометр», а также реализован способ линеаризации градуировочной зависимости в широком диапазоне концентраций, предложенный Д. А. Кацковым. Добавлена возможность спектрофотометрического определения веществ в растворах их смесей. Разработаны инструменты «Сканер штрихкодов» и «Автоматический запуск измерений» для ускорения и автоматизации анализа. Программа дополнена набором полезных функций, предназначенных для разработки аналитических методик и программ анализа.

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионная спектрометрия; атомно-абсорбционная спектрометрия; спектрофотометрия; одновременный многоэлементный анализ; многоканальные детекторы; анализатор МАЭС; программное обеспечение.

## “ATOM” SOFTWARE FOR ATOMIC SPECTRAL ANALYSIS

© Viktor G. Garanin<sup>1</sup>, Oleg A. Neklyudov<sup>1</sup>, Dmitry V. Petrochenko<sup>1</sup>,  
Zakhar V. Semenov<sup>1,2</sup>, Stepan V. Pankratov<sup>1,2</sup>, Pavel V. Vashchenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> “VMK-Optoélektronika”, Novosibirsk, Russia; e-mail: oleg@vmk.ru

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.

*Received October 17, 2018. Revised October 28, 2018. Accepted November 25, 2018.*

“Atom” software is used in integrated spectral devices for atomic emission and atomic absorption analysis produced by “VMK-Optoélektronika”. Development of the new spectral instruments and upgrading of existing devices, birth of new mathematical methods and algorithms for processing spectral information, as well as user stories motivate and promote improvement of the software. This paper presents the main developments and most noticeable changes in “Atom” software for the period 2017 – 2018. The developed 64-bit version of “Atom” software removed the limitation on the amount of recorded sequences of spectra and significantly speeded up their processing by parallelizing the calculations on the processor cores (rather important step, for example, in scintillation atomic emission spectrometry). To implement continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry for simultaneous multi-element analysis, we have developed the “Automatic Dispenser” and “Absorption Spectrometer” tools and have implemented the method proposed by D.A. Katskov to linearize calibration dependences in a wide range of concentrations. The possibility of spectrophotometric determination of substances in the solutions of their mixtures has been also implemented. The “Barcode Scanner” and the “Automatic Start of Measurement” tools

have been developed to speed up and automate the analysis procedure. The software is supplemented with a set of useful functions designed for further development of analytical methods and programs of analysis.

**Keywords:** atomic emission spectrometry; atomic absorption spectrometry; spectrophotometry; simultaneous multi-element analysis; multichannel detectors; MAES analyzer; software.

Программное обеспечение «Атом» [1] (ПО «Атом»), работающее в операционной системе Microsoft Windows версий “XP”, “Vista”, 7, 8 или 10, входит в состав аналитического спектрального оборудования производства компании «ВМК-Оптоэлектроника». Внешний вид главного окна ПО «Атом» представлен на рис. 1.

«Атом» предоставляет аналитику широкий набор универсальных и специализированных инструментов, выполняет все необходимые операции для получения результатов, позволяя с высокой эффективностью проводить как рутинный, так и нестандартный анализ.

Основные задачи, решаемые ПО «Атом»

измерение интенсивности в спектре, управление всеми компонентами аналитического прибора;

отслеживание и стабилизация параметров прибора: калибровка по длинам волн, уровень

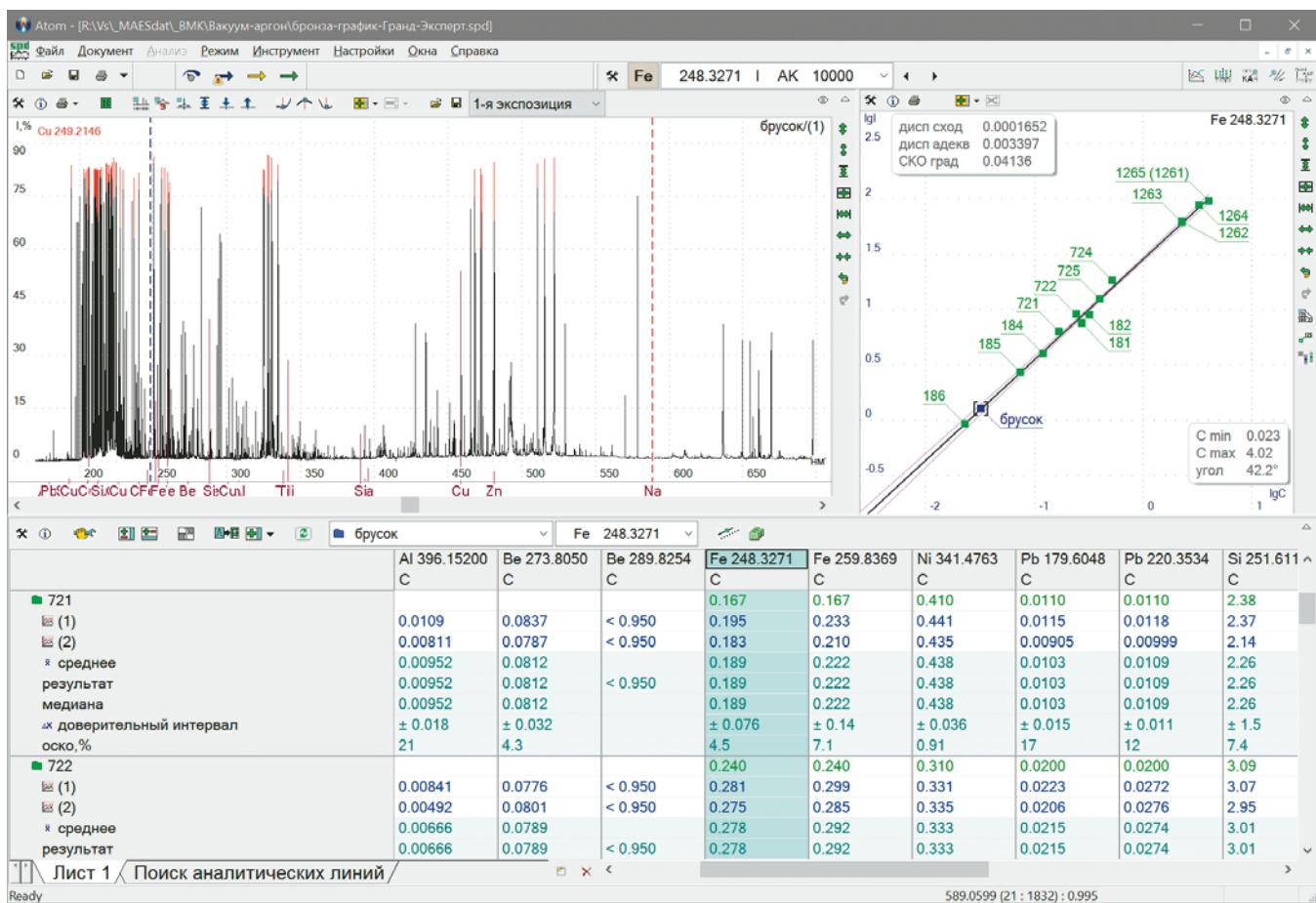
темнового сигнала, поток газа, уровень вакуума и т.д.;

реализация различных методик анализа: количественный, качественный, полуколичественный;

статистическая обработка результатов: вывод средних значений, среднеквадратичных отклонений, доверительных интервалов, размахов, медиан, контроль сходимости и воспроизводимости по заданным нормативным значениям;

возможность изменения параметров вычислений, в том числе списка аналитических линий, расчет скорректированных результатов анализа без необходимости проведения повторного анализа проб;

получение графиков зависимости интенсивности линий от времени, снижение пределов обнаружения за счет учета фракционного поступления элементов в плазму разряда;



**Рис. 1.** Внешний вид главного окна программы «Атом»

вывод спектров, градуировочных графиков, результатов анализа на экран и на печать;

ведение различных баз данных: спектральных линий, состава сплавов, стандартных образцов, нормативных и метрологических характеристик аналитических методик;

экспорт результатов анализа и отчетов в другие программы, передача в базы данных предприятия.

Программа постоянно развивается: учитываются пожелания инженеров и аналитиков, совершенствуются существующие и разрабатываются новые спектральные аналитические приборы, улучшаются математические методы и алгоритмы обработки спектральной информации. ПО «Атом» разрабатывается с применением передовых информационных технологий.

Далее описаны основные изменения в программе «Атом» за период 2017 – 2018 гг.

**64-битная версия программы «Атом».** В сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии [2], атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией [3, 5, 7, 8] и при определении неметаллических включений методом искровой атомно-эмиссионной спектрометрии [9] регистрируют последовательности спектров в широком спектральном диапазоне с разрешением по длине волн 0,01 нм и по времени — 1 мс при полном времени измерения до десятков секунд. Это приводит к значительному увеличению объемов спектральных данных. На этапе разработки методики размер файла программы анализа может достигать двух десятков Гбайт. 32-битная программа «Атом» теоретически ограничена объемом в 2 Гбайт, а на практике — значением около 1,2 Гбайт, что не позволяло работать с последовательностями спектров с высоким разрешением по времени и по длине волн. 64-битная версия ПО «Атом» ограничена только ресурсами компьютерного оборудования, так как способна работать с объемами памяти до 16 Эбайт (16 млн Тбайт).

В процессе разработки 64-битной версии ПО «Атом» был создан единый исходный код программы, из которого, применяя различные версии стандартных библиотек и настроек компилятора, в результате трансляции в бинарный исполняемый код получается либо 32-битная версия программы, либо 64-битная, либо 32-битная для Windows XP. Проведены длительное тестирование, отладка, поиск и исправление ошибок, которые неизбежно возникают при столь масштабных изменениях.

Для упрощения этапа отладки в программу были внесены специализированные инструменты — трассировка диагностических сообщений (рис. 2) и перехват исключительных ситуаций с

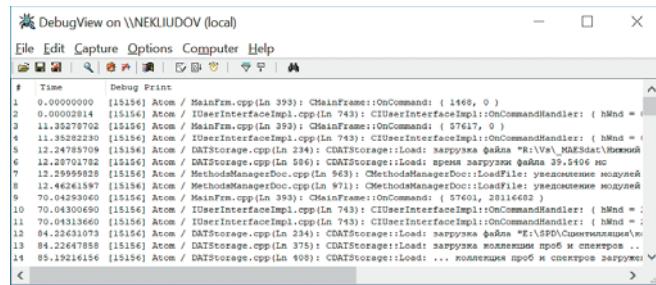


Рис. 2. Окно с диагностическими сообщениями программы «Атом»

сохранением снимка состояния программы. При возникновении критической ошибки программа перед завершением работы выводит сообщение и сохраняет специальный файл crashdump.dmp, с помощью которого разработчик может воспроизвести состояние программы и определить причину проблемы.

Увеличение объемов информации влечет за собой увеличение количества времени, требуемого на ее обработку. Учитывая нелинейный характер многих алгоритмов — наиболее характерна степенная зависимость количества операций от размера входных данных, длительность вычисления результатов по всей таблице анализа для больших файлов могла достигать нескольких десятков минут. Существенно ускорить операцию удалось за счет разработки специальной версии алгоритма, допускающей параллельное (одновременное) вычисление результатов для разных ячеек таблицы анализа на разных вычислительных блоках (ядрах) процессора. Таким образом, на типичном четырехядерном компьютере ускорение составляет 3 – 4 раза. Решение легко масштабируется, и если такого ускорения будет недостаточно, то возможно использование более мощного современного компьютера — например, с 8 или 16 вычислительными ядрами: при этом кратно уменьшается количество времени, затрачиваемого на выполнение операций.

**Спектрофотометрия.** В программу добавлена возможность проведения анализа спектрофотометрическим методом. Метод основан на регистрации спектров поглощения жидкостей или твердых тел (рис. 3).

Связь между концентрацией вещества и измеренной величиной поглощения (оптической плотностью) описывается с помощью основного закона светопоглощения — объединенного закона Бугера – Ламберта – Бера [4]

$$A_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} Cl, \quad (1)$$

где  $A_{\lambda}$  — оптическая плотность раствора;  $\varepsilon_{\lambda}$  — молярный коэффициент светопоглощения;  $C$  —

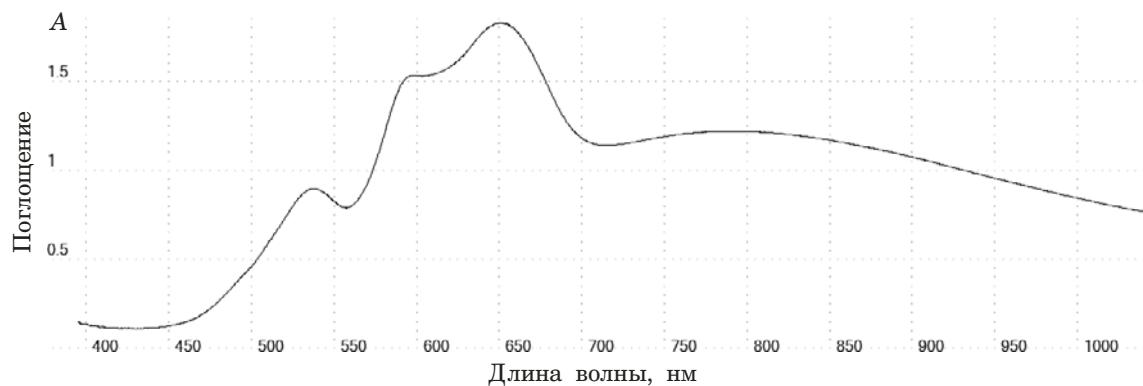


Рис. 3. Спектр поглощения светофильтра СС8

концентрация поглощающего вещества;  $l$  — толщина слоя раствора.

Если раствор содержит несколько светопоглощающих компонентов, то его оптическая плотность будет равна сумме парциальных оптических плотностей всех содержащихся в растворе светопоглощающих компонентов — «правило аддитивности» [4]

$$A_{\lambda} = l \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\lambda} C_i. \quad (2)$$

Пример спектра двухкомпонентной системы приведен на рис. 4.

Применение выражения (2) ко всем заданным длинам волн  $\lambda$  (точкам измерения интенсивности) приводит нас к модели множественной линейной регрессии с переопределенной системой линейных алгебраических уравнений, для решения которой применяется метод наименьших квадратов специального вида. Решением являются содержания всех заданных компонентов (веществ) в исследуемом многокомпонентном растворе.

Для проведения спектрофотометрического анализа в программе «Атом» необходимо в общих настройках анализа указать метод «спектрофотометрия». После этого с помощью кнопки («желтая стрелка») регистрируют опорный спектр (спектр лампы), который необходим для измерения поглощения вещества в единицах оптической плотности. В таблицу анализа следует внести длины волн, соответствующие наиболее характерным полосам поглощения определяемых веществ. Для каждой длины волны нужно задать область спектра, которая будет использоваться для вычислений, также можно указать весь диапазон спектра. Затем регистрируют спектры чистых компонентов (в растворителе) и заносят их в таблицу анализа с указанием концентрации. По этим спектрам программа вычислит молярные коэффициенты поглощения каждого вещества. Для анализа исследуемой многокомпонентной смеси необходимо зарегистрировать ее спектр и занести его в таблицу анализа. Программа методом множественной линейной регрессии рассчитает коэффициенты при линейном разложении спектра на спектры чистых ве-

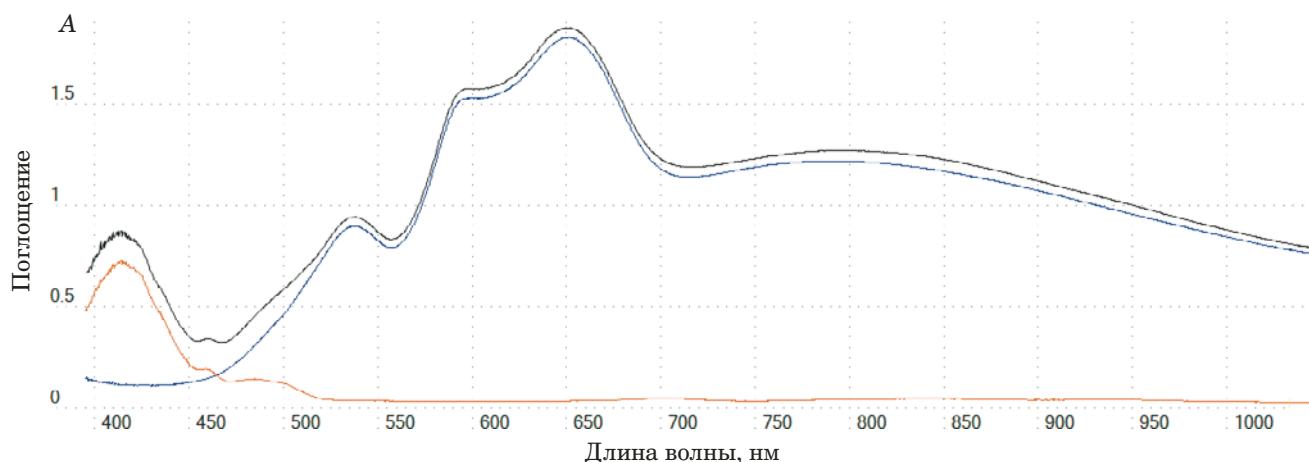


Рис. 4. Спектры поглощения: светофильтра ЖС19 (оранжевый), СС8 (синий) и суммарный спектр двух светофильтров (черный)

	Al 706.364 C	Fe 971.1188 C	Cu 500.98 C	Ag 418.548 C
cc8+nc7 (1) среднее	1.01 1.01	0.956 0.956	0.000125 < 0.0100	2.14e-6 < 0.0100
pc5+cc8 (1) среднее	1.01 1.01	< 0.0100 1.01	1.02 1.02	8.82e-6 < 0.0100
xc19+cc8 (1) среднее	1.01 1.01	< 0.0100 1.01	< 0.0100 1.09	1.09 1.09

Рис. 5. Пример вычисления содержаний спектрофотометрическим методом

ществ и выведет результат в таблице анализа. Результаты модельного эксперимента приведены на рис. 5. Подробное описание доступно в «Руководстве по спектрофотометрическому методу анализа в программе «Атом».

*Метод Кацкова.* Дальнейшее развитие получил метод атомно-абсорбционной спектрометрии высокого разрешения с источником непрерывного спектра [3, 7, 8]. Программа дополнена возможностью линеаризации градуировочной зависимости в широком диапазоне концентраций способом, предложенным Д. А. Кацковым. При измерении поглощения на длине волн заданной атомной линии наблюдаются заметные искажения формы линии поглощения при достаточно высоких значениях концентрации элемента (рис. 6). Это с неизбежностью приводит к занижению значения поглощения и искривлению градуировочной зависимости. В работе [5] описана предполагаемая природа таких искажений и

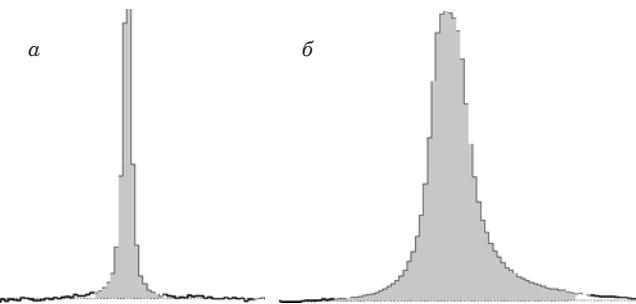


Рис. 6. Форма линии поглощения при низких (а) и высоких (б) содержаниях определяемого элемента

предложен способ коррекции уже измеренных значений поглощения

$$S_t^* = S_t - 0,5 \left[ S_t - \frac{(S_t + C_1)^2}{4C_1} \right] [1 + \text{Sign}(S_t - C_1)], \quad (3)$$

где  $S_t$  — значение поглощения в момент времени  $t$ ;  $C_1$  — параметр метода. Коррекции подверга-

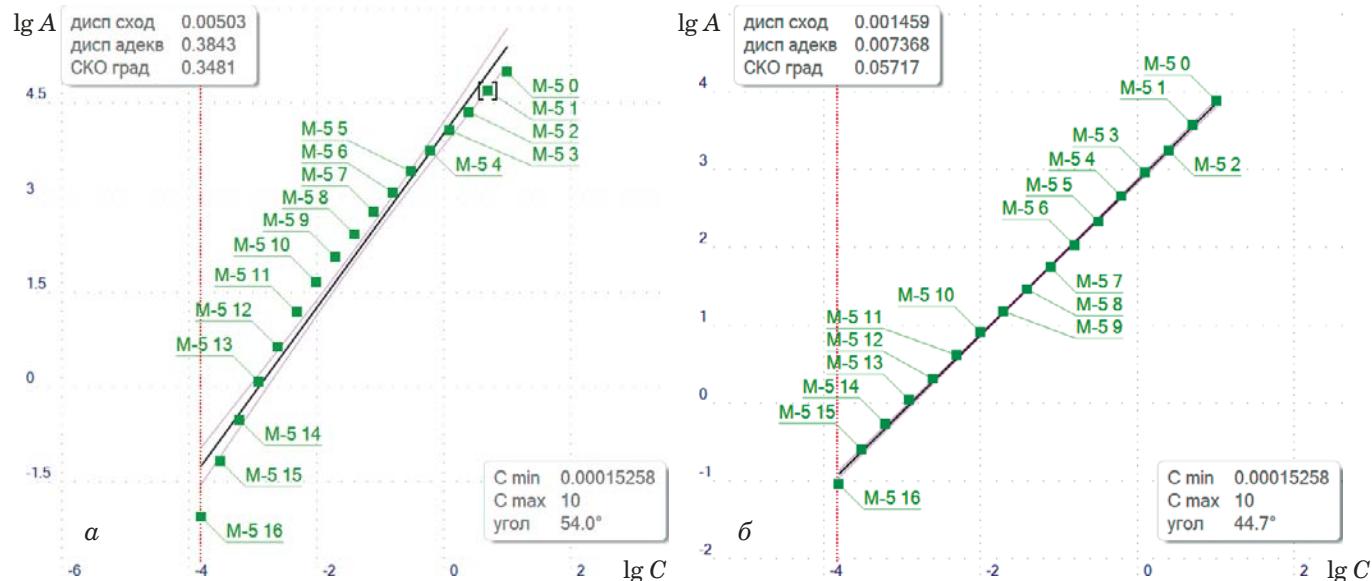


Рис. 7. Градуировочная зависимость для атомно-абсорбционного определения серебра по линии 328,068 нм: а — до коррекции; б — после коррекции методом Кацкова

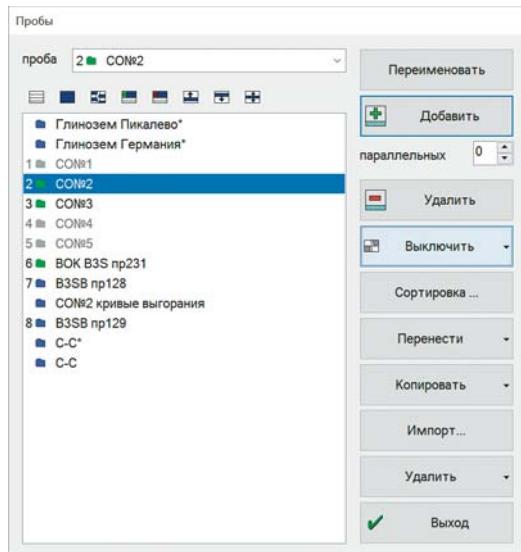


Рис. 8. Диалог «Пробы» и кнопка «Выключить»

ется каждая точка графика зависимости интенсивности от времени экспозиции. На рис. 7 приведены градуировочные зависимости до и после коррекции.

«Выключение» множества проб или спектров позволяет исключить из расчетов некоторые результаты измерений. Обычно для выполнения этой операции достаточно окна «Таблица анализа» и соответствующего пункта контекстного меню. Но иногда требуется исключить из расчета сразу большое количество измерений, например все параллельные определения для всех образцов сравнения, что может оказаться трудоемкой операцией для достаточно большой таблицы. Новая кнопка «Выключить...» в диалоге «Пробы» (рис. 8) позволяет выполнить это действие максимально эффективно для любого количества проб. Кроме того, ранее при исключении/включении строк таблицы целиком «забывалось», какие ячейки в таблице анализа, расположенные на этой строке, были исключены индивидуально. Теперь такая ситуация исключена.

**Копирование спектральных линий между таблицами анализа разных файлов.** Такая задача часто возникает при формировании новой программы анализа на основе одной или нескольких уже существующих. Для выполнения этой процедуры необходимо открыть несколько файлов и с помощью диалога «Столбцы» выбрать в списке одну или несколько спектральных линий, затем нажать «Копировать» (рис. 9) с указанием файла, в который нужно скопировать данные.

**Подбор линии сравнения в окне «Настройки анализа».** Появилась функция, помогающая подобрать линию сравнения из числа уже внес-

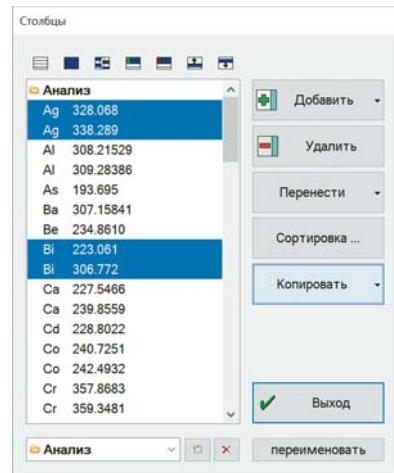


Рис. 9. Диалог «Столбцы» и кнопка «Копировать»

енных в таблицу анализа линий. Если во вкладке «Линия сравнения» настроек анализа указать элемент, спектральные линии которого следует использовать в качестве линий сравнения (рис. 10), затем нажать «Подобрать», то программа вычислит и выведет характеристики построенных с использованием соответствующих линий сравнения градуировочных зависимостей — угол, дисперсию адекватности и СКО градуировки. Ориентируясь на эти значения, можно выбрать линию, например, с наименьшим значением СКО.

**Дополнительная информация на основе XML.** Дальнейшее развитие получили средства работы с дополнительной информацией на основе XML (рис. 11). С помощью специально разработанного языка были описаны поля дополнительной информации, что позволило выводить названия полей и единиц измерения в удобном для пользователя виде. Любые поля информации могут быть выведены в таблице анализа, что дает возможность наблюдать значения этих полей в зависимости от номера измерения или от времени. Кроме того, поля, имеющие числовые значения, могут быть выведены в виде графика-среза по таблице анализа. Было существенно увеличено количество полей дополнительной информации: добавлены значения датчиков МАЭС до и после измерения, полная информация о работе автоматической коррекции калибровки по длинам волн и многое другое.

**Автоматический запуск измерений.** Инструмент «Автоматический запуск измерений» предназначен для непрерывного, с заданным интервалом времени, измерения интенсивности в спектре и занесения в таблицу анализа с возможностью разбиения на серии по пробам (рис. 12). Этот инструмент необходим для осуществления непрерывного контроля технологического про-

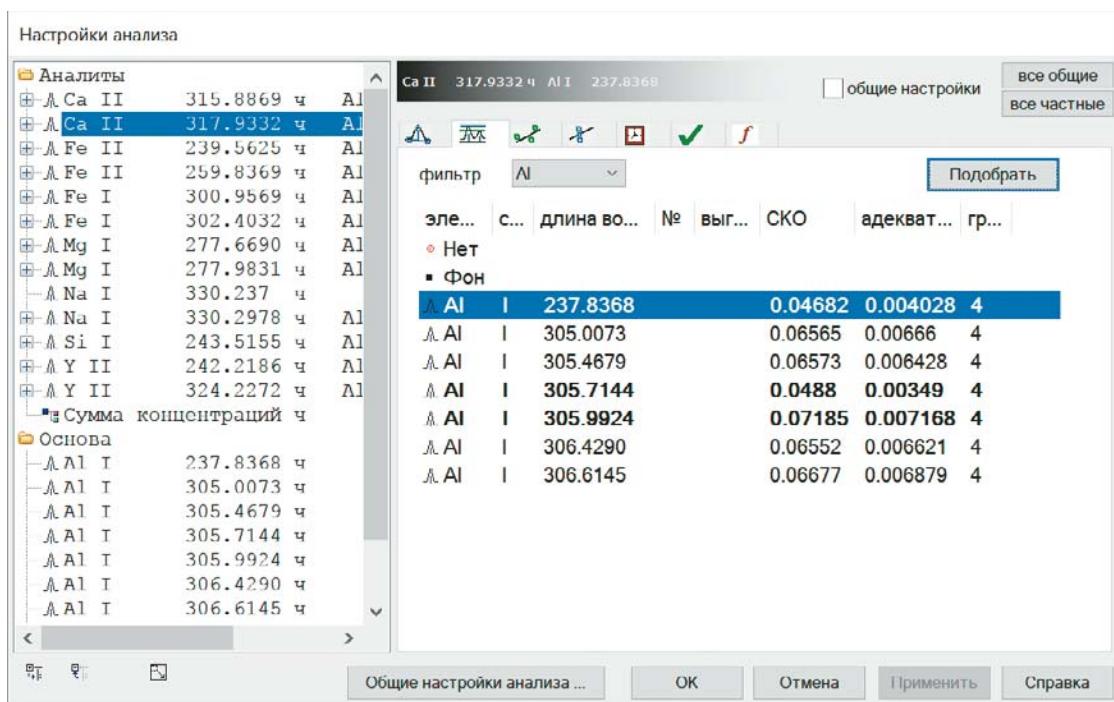


Рис. 10. Окно выбора линии сравнения и кнопка «Подобрать»

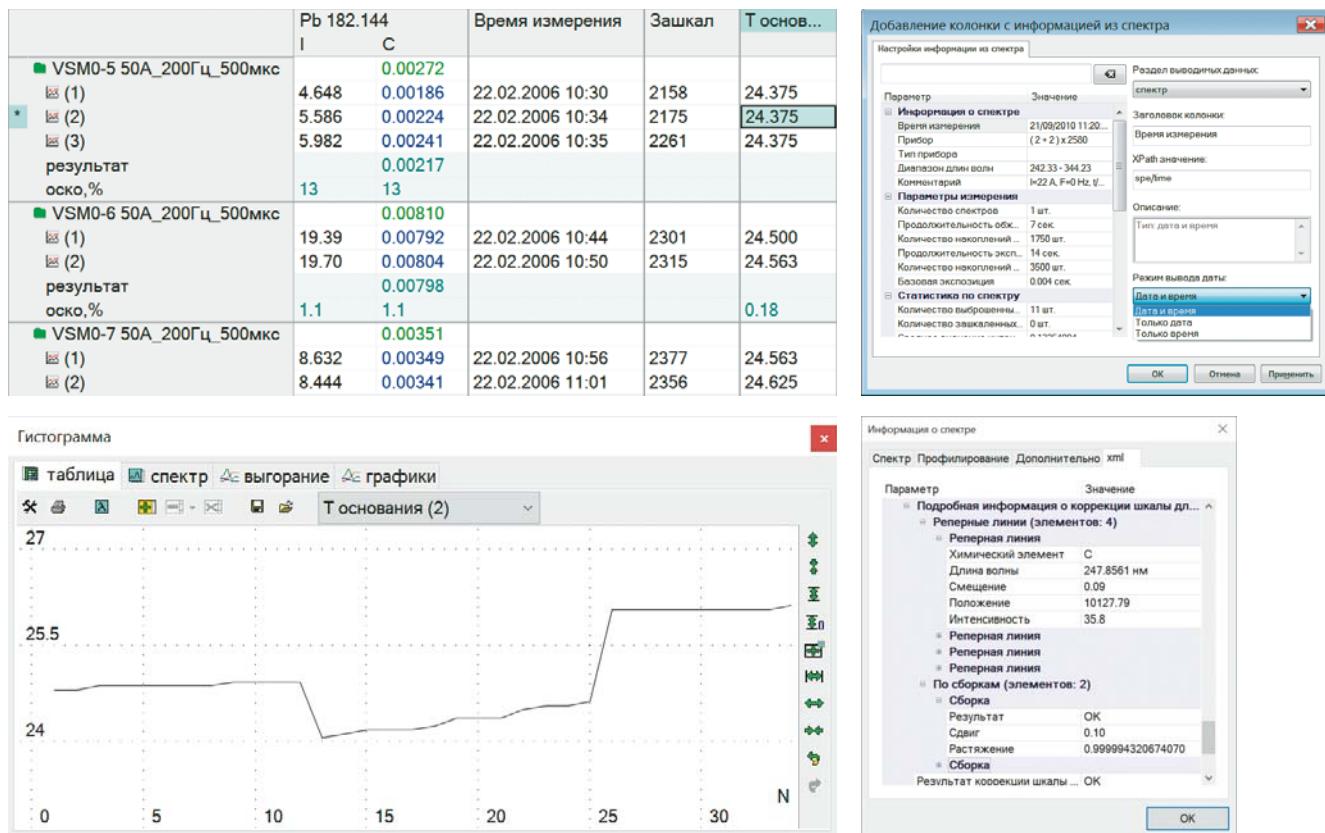


Рис. 11. Различные представления дополнительной информации в программе «Атом»

цесса на предприятии с помощью спектрального прибора. Результаты определения заданных химических элементов доступны в режиме реального времени как в числовом, так и в графическом

виде (зависимость содержания от времени). Возможен экспорт результатов в базу данных предприятия или в любую другую информационную систему.

**Сканер штрихкодов.** Инструмент «Сканер штрихкодов» позволяет с помощью ручного сканера штрихкода вводить в программу идентификатор пробы и запускать измерение (рис. 13). Маркировка проб с помощью штриховых или QR-кодов упрощает процедуру проведения анализа, сокращает вероятность человеческих ошибок и уменьшает количество времени, требуемого для выполнения операции.

**Абсорбционный спектрометр.** Компьютерное управление процессом измерения с использованием атомно-абсорбционного спектрометра осуществляется с помощью модуля «Абсорбци-

онный спектрометр», основное окно которого показано на рис. 14. Подробное описание приведено в статье [6].

**Автодозатор.** Для управления устройством автоматического отбора, дозирования и подачи жидких проб разработан модуль «Автоматический дозатор», позволяющий автоматизировать процедуру измерения и занесения результатов в таблицу анализа программы «Атом» для большого количества проб (рис. 15). Подробное описание приведено в статье [6].

Таким образом, создана 64-битная версия программы «Атом», позволившая снять ограничение на объем регистрируемых последовательностей спектров и существенно ускорить их обработку, что особенно важно в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермиче-

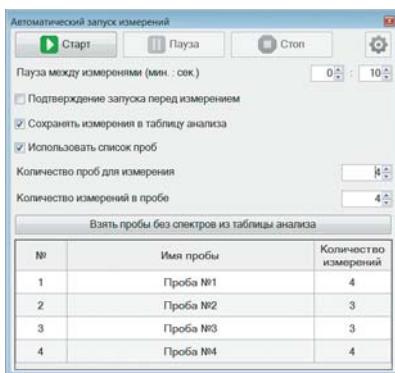


Рис. 12. Инструмент «Автоматический запуск измерений»

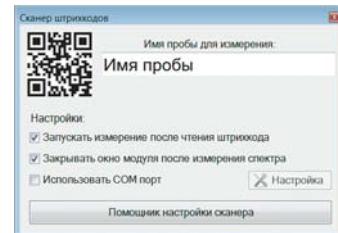


Рис. 13. Окно инструмента «Сканер штрихкодов»

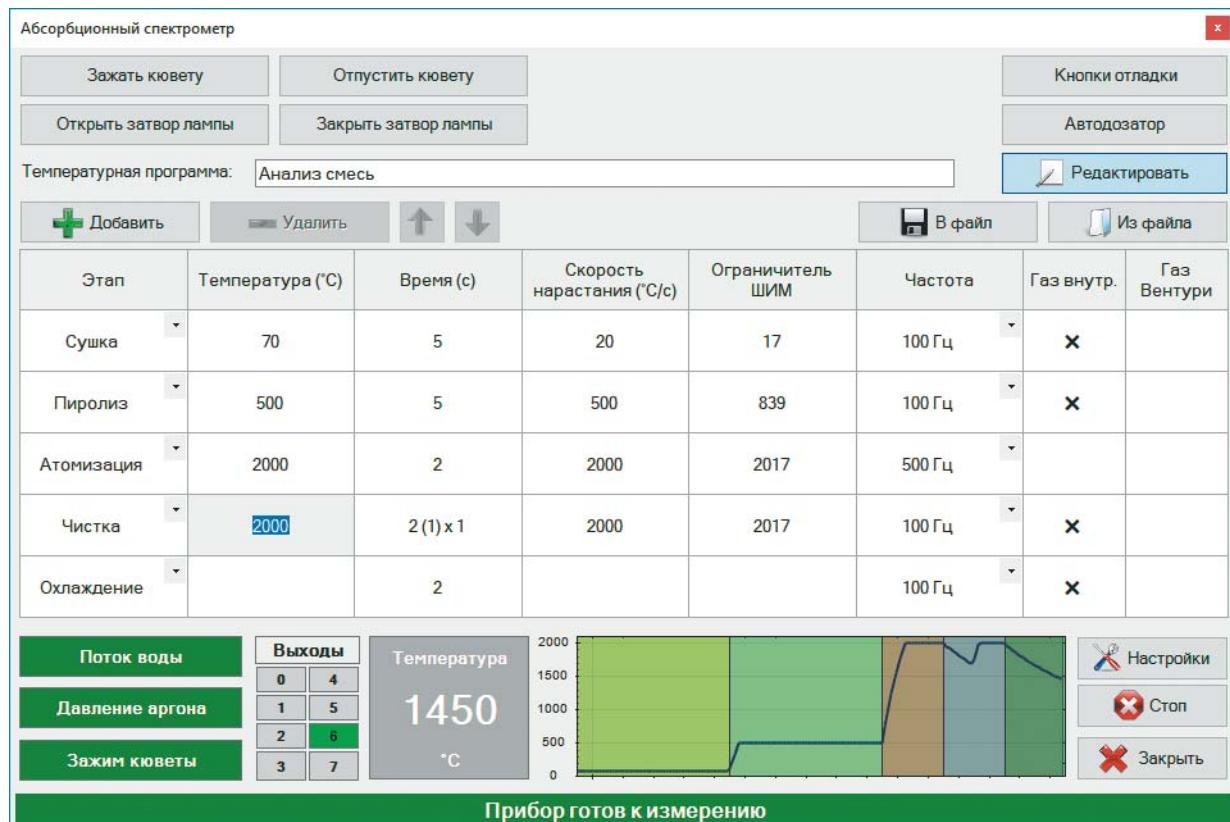


Рис. 14. Окно модуля управления «Абсорбционный спектрометр»

ской атомизацией и при определении неметаллических включений методом искровой атомно-эмиссионной спектрометрии.

В программу добавлена возможность определения веществ в растворах их смесей спектрофотометрическим методом; реализован способ линейаризации градуировочной зависимости для метода атомно-абсорбционной спектрометрии высокого разрешения с источником непрерывного спектра; разработаны новые инструменты: «Сканер штрихкодов», «Автоматический запуск измерений», «Автоматический дозатор» и «Абсорбционный спектрометр». Программа также дополнена рядом полезных функций для облегчения работы пользователей программы: исключение из расчета ряда проб или спектров, копирование спектральных линий между таблицами анализа разных файлов, подбор линии сравнения в окне «Настройки анализа» и др.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др. Программное обеспечение атомно-эмиссионного спектрального анализа. Программа «Атом» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 121 – 127.
- Шабанова Е. В., Бусько А. Е., Васильева И. Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким временным разрешением / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 24 – 33.
- Болдова С. С., Путымаков А. Н., Лабусов В. А. и др. О создании прибора для одновременного многоэлементного атомно-абсорбционного спектрального анализа на основе спектрометра с высокой дисперсией и источником непрерывного спектра / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 148 – 153.
- Булатов М. И., Калинкин И. П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. — Л.: Химия, 1986. — 432 с.
- Katskov D., Hlongwane M., Heitmann U., Florek S. High-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry: Linearization of the calibration curves within a broad concentration range / Spectrochim. Acta. Part B. 2012. Vol. 71 – 72. P. 14 – 23.
- Семенов З. В., Болдова С. С., Лабусов В. А., Селюнин Д. О. Программные модули для управления атомно-абсорбционным спектрометром и автоматическим дозатором / Материалы XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 205 – 210.
- Болдова С. С., Лабусов В. А., Бокк Д. Н. Оценка аналитических возможностей атомно-абсорбционных спектрометров высокого и низкого спектрального разрешения с источником непрерывного спектра / Материалы XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 140 – 149.
- Лабусов В. А., Болдова С. С., Селюнин Д. О. и др. Атомно-абсорбционные спектрометры с источником непрерывного спектра и анализатором МАЭС для одновременного многоэлементного анализа / Материалы XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 7 – 14.

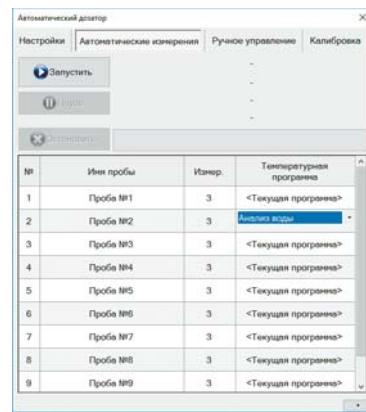


Рис. 15. Окно модуля управления «Автоматический дозатор»

- Бокк Д. Н., Лабусов В. А., Зарубин И. А. Определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 92 – 97.

## REFERENCES

- Garanin V. G., Nekludov O. A., Petrochenko D. V., et al. Software for Atomic Emission Spectral Analysis. “Atom” Software / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 121 – 127 [in Russian].
- Shabanova E. V., Bus’ko A. E., Vasil’eva I. E. Scintillation Arc Atomic Emission Analysis of Powder Samples Using MAES with High Temporal Resolution / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 24 – 33 [in Russian].
- Boldova S. S., Put’makov A. N., Labusov V. A., et al. On the Development of a Device for Simultaneous Multi-Element Atomic Absorption Spectral Analysis Based on a High-Dispersion Spectrometer and a continuous spectrum source / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 148 – 153.
- Bulatov M. I., Kalinkin I. P. A practical guide to photometric methods of analysis (5th ed.). — Leningrad: Khimiya, 1986. — 432 p. [in Russian].
- Katskov D., Hlongwane M., Heitmann U., Florek S. High-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry: Linearization of the calibration curves within a broad concentration range / Spectrochim. Acta. Part B. 2012. Vol. 71 – 72. P. 14 – 23.
- Semenov Z. V., Boldova S. S., Labusov V. A., Selyunin D. O. Software modules for control of atomic absorption spectrometer and automatic dispenser / Proc. of the XVI Int. symposium “Application of MAES analyzers in industry”, Novosibirsk, 2018. P. 205 – 210 [in Russian].
- Boldova S. S., Labusov V. A., Bock D. N. Evaluation of analytical capabilities of atomic absorption spectrometers of high and low spectral resolution with a source of continuous spectrum / Proc. of the XVI Int. symposium “Application of MAES analyzers in industry”, Novosibirsk, 2018. P. 140 – 149 [in Russian].
- Labusov V. A., Boldova S. S., Selyunin D. O., et al. Atomic absorption spectrometers with a continuous spectrum source and a MAES analyzer for simultaneous multi-element analysis / Proc. of the XVI Int. symposium “Application of MAES analyzers in industry”, Novosibirsk, 2018. P. 7 – 14 [in Russian].
- Bock D. N., Labusov V. A., Zarubin I. A. Determination of Non-Metallic Inclusions in Metal Alloys by Spark Optical Emission Spectrometry / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 92 – 97 [in Russian].