

К 30-летию «ВМК-Оптоэлектроника» To the 30th anniversary of VMK-Optoelektronika

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-5-14>

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АТОМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА «АТОМ»

© Виктор Геннадьевич Гаранин¹, Олег Александрович Неклюдов^{1,2*},
Дмитрий Владимирович Петроченко¹, Захар Владимирович
Семёнов^{1,2}, Павел Владимирович Ващенко^{1,2}

¹ ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1, к. 100;

*e-mail: oleg@vmk.ru

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

*Статья поступила 9 октября 2021 г. Поступила после доработки 15 ноября 2021 г.
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Представлены возможности программного обеспечения «Атом», входящего в состав спектрального аналитического оборудования производства компании «ВМК-Оптоэлектроника». Показаны варианты измерения интенсивности линий в спектрах, полученных с использованием различных источников возбуждения — ИСП, микроволновая плазма, дуговой и искровой разряд в воздушной или аргоновой среде и др. Описаны процедуры, обеспечивающие прослеживаемость результатов измерений. Кратко описаны этапы вычислений — от интенсивности спектральной линии до содержания элемента в пробе, а также расчет статистических показателей и метрологический контроль методики измерения согласно ГОСТ Р ИСО 5725. Развитые средства экспорта данных не только позволяют организовать передачу результатов во внешние информационные системы, но и расширяют функциональные возможности программы, опираясь на взаимодействие с другими приложениями. В программном обеспечении «Атом» представлено несколько методов спектрального анализа, в том числе с временным разрешением (сцинтилляция, абсорбция, анализ неметаллических включений). В виде отдельных дополнительных инструментов предложены методики качественного и полуколичественного анализа. Комплект поставки программного пакета «Атом» содержит вспомогательные информационные системы: базу данных спектральных линий, марочник сплавов, каталог стандартных образцов с аттестованными содержаниями элементов, а также базу данных нормативных значений метрологических характеристик методов измерения. Отличительной особенностью программного обеспечения «Атом» является продуманный интерфейс пользователя, позволяющий с высокой производительностью работать с любым спектроаналитическим оборудованием. Современная модульная архитектура программы позволяет эффективно управлять сложностью проекта и вести независимую разработку отдельных компонент с использованием подходящих инструментов.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектрометрия; атомно-абсорбционная спектрометрия; спектрометр; анализатор спектров МАЭС; линейка фотодетекторов; одновременное определение элементов.

“ATOM” SOFTWARE FOR ATOMIC SPECTRAL ANALYSIS

© Viktor G. Garanin¹, Oleg A. Neklyudov^{1,2*}, Dmitry V. Petrochenko¹,
Zakhar V. Semenov^{1,2}, Pavel V. Vashchenko^{1,2}

¹ VMK-Optoelektronika, 1-100, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia; *e-mail: oleg@vmk.ru

² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia.

Received October 9, 2021. Revised November 15, 2021. Accepted November 24, 2021.

The capabilities of the Atom software used in the spectral analytical equipment manufactured by the VMK-Optoelektronika company are presented. Spectral measurements using various sources — inductively coupled plasma, microwave plasma, arc and spark discharge in air or argon atmosphere, atomic absorption, etc. — are discussed. Procedures allowing the traceability of measurement results are described.

The calculation steps starting with calculation of the spectral line intensity to determination of the element content in the sample are briefly considered, as well as the estimation of statistical indicators and the metrological control of the measurement procedure according to GOST R ISO 5725. The advanced data export tools allow the transfer of results to external information systems, and, moreover, expand the functionality of the program through interaction with other applications. Various options for printing out using compact and extended presentations of results in the form of reports are available. The Atom software covers several methods of spectral analysis, including time-resolved spectrometry (scintillation, absorption, and analysis of non-metallic inclusions). Methods of qualitative and semi-quantitative analysis are offered in the form of separate additional tools. The Atom software distribution kit contains auxiliary information systems: a database of spectral lines, an alloy grade guide, a catalog of standard samples with certified elemental composition, and a database of the standard metrological characteristics of measurement methods. A distinctive feature of the Atom software is a well-thought-out user interface for the operation of any spectral-analytical equipment with high performance. The modern modular architecture of the program provides effective management of the project complexity and enables independent development of individual components using suitable tools.

Keywords: atomic emission spectrometry; atomic absorption spectrometry; spectrometer; spectrum analyzer MAES; photodetector arrays; simultaneous determination of elements.

Введение

В настоящее время в аналитических лабораториях России и стран СНГ широко используют спектральные комплексы для атомно-эмиссионного анализа с многоканальными анализаторами эмиссионных спектров (МАЭС) [1 – 3]. Эти комплексы работают под управлением программного обеспечения (ПО) «Атом» [4], которое входит в состав анализаторов МАЭС. Развитие метода сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии (САЭС) [5 – 7] и определения неметаллических включений в металлических сплавах ме-

тодом атомно-эмиссионной спектроскопии с ионным возбуждением [8] потребовало создания новых быстродействующих и высокочувствительных фотодетекторов [9, 10] и соответствующих инструментов в ПО «Атом» для работы с временными последовательностями из десятков тысяч спектров. Создание атомно-абсорбционных спектрометров с анализаторами МАЭС [11], спектрометров с микроволновой плазмой [12, 13] и индуктивно-связанной плазмой [14], оснащенные спектрометрами автодозаторами, видеоканерами, сканерами штрих-кодов и другими устрой-

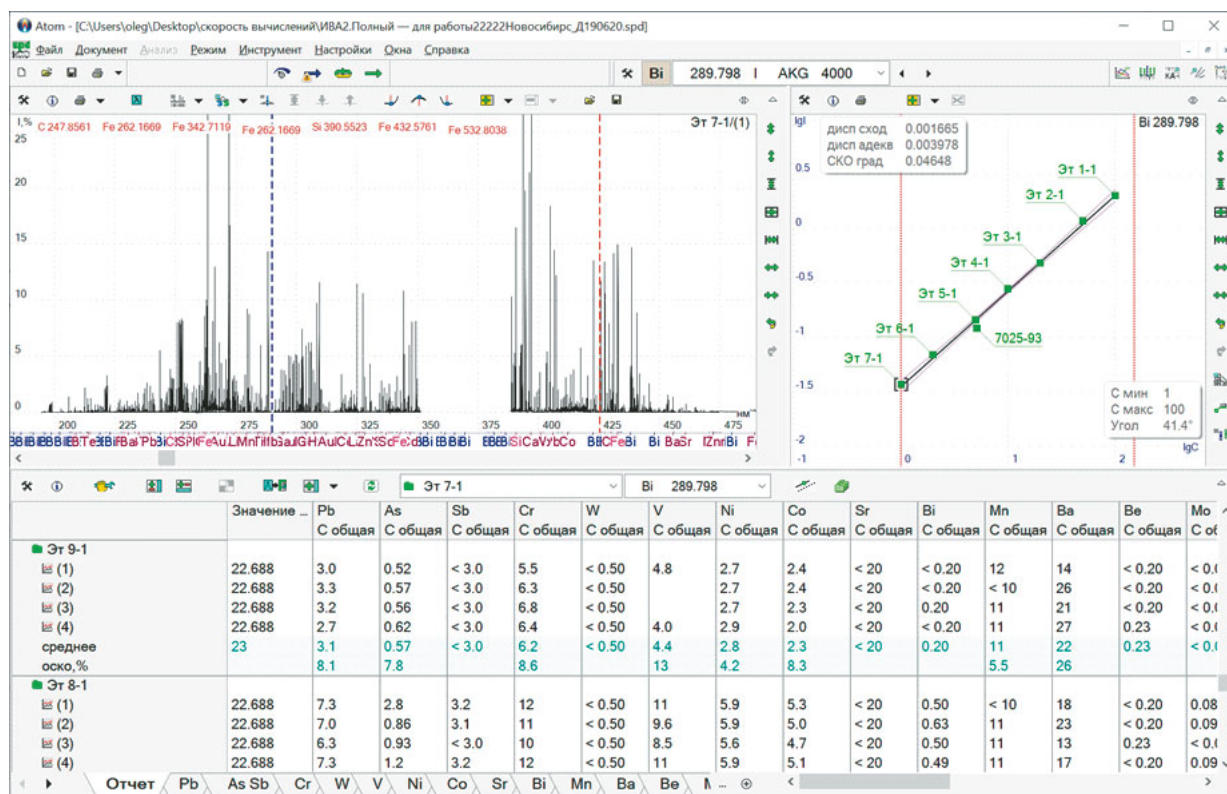


Рис. 1. Внешний вид главного окна программы «Атом»

Fig. 1. View of the main window of the «Atom» program

ствами потребовало соответствующего развития ПО «Атом».

Цель данной работы — ознакомление специалистов с современным уровнем программного обеспечения атомного спектрального анализа «Атом».

ПО «Атом» работает в операционной системе Microsoft Windows версий XP, Vista, 7, 8 и 10. «Атом» позволяет с высокой эффективностью решать как рутинные, так и нестандартные аналитические задачи, предоставляя оператору широкий набор универсальных и специализированных инструментов (рис. 1).

Управление спектральным комплексом

Для измерения интенсивности в спектре программа оснащена стандартным модулем, позволяющим задавать универсальные параметры режима измерения, такие как базовая экспозиция, время обжига и общее время измерения. Для управления специфическими частями конкретного спектрального комплекса служит набор допол-

нительных модулей: «Генератор Везувий-3», «Аргоновый штатив» (рис. 2), «Программно-управляемый лазер», «Видеокамера», «Атомно-абсорбционный спектрометр» (рис. 3), «СВЧ спектрометр» (рис. 4), «Автоматический дозатор» (рис. 5) и др.

Модули управления обеспечивают согласованную работу частей комплекса, осуществляют индикацию, стабилизацию и запись таких параметров как температура, давление, ток разряда, поток газа, уровень вакуума, межэлектродное расстояние (см. рис. 2 – 4) и др.

Помимо ручного запуска измерения с экрана компьютера или от внешнего пульта, существуют различные варианты автоматизированных измерений, включая использование автодозаторов (см. рис. 4, 5).

Возможности универсального модуля «Автоматические измерения» (рис. 6) позволили интегрировать спектрофотометр «Колибри-2» в систему автоматического контроля непрерывных тех-

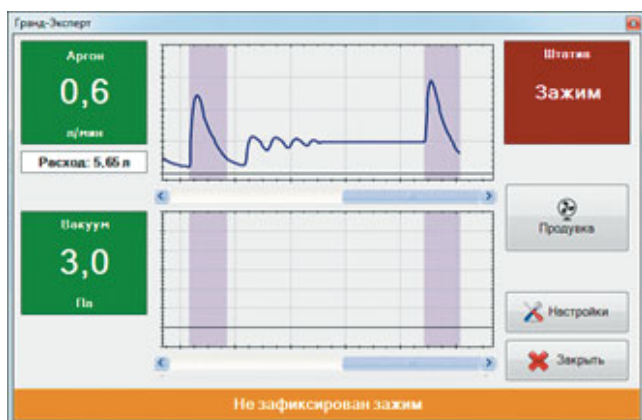


Рис. 2. Модуль управления «Аргоновый штатив»

Fig. 2. “Argon rack” control module

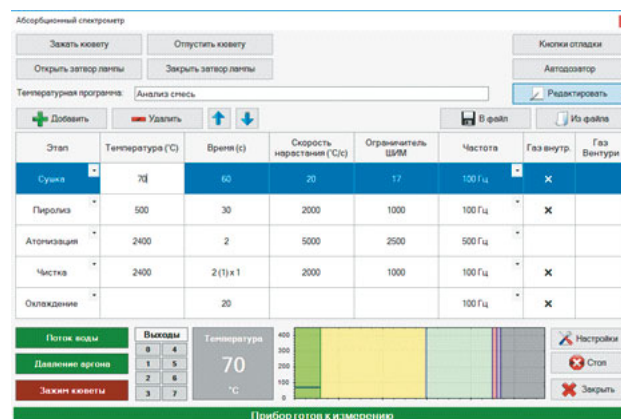


Рис. 3. Модуль управления «Атомно-абсорбционный спектрометр»

Fig. 3. “Atomic absorption spectrometer” control module

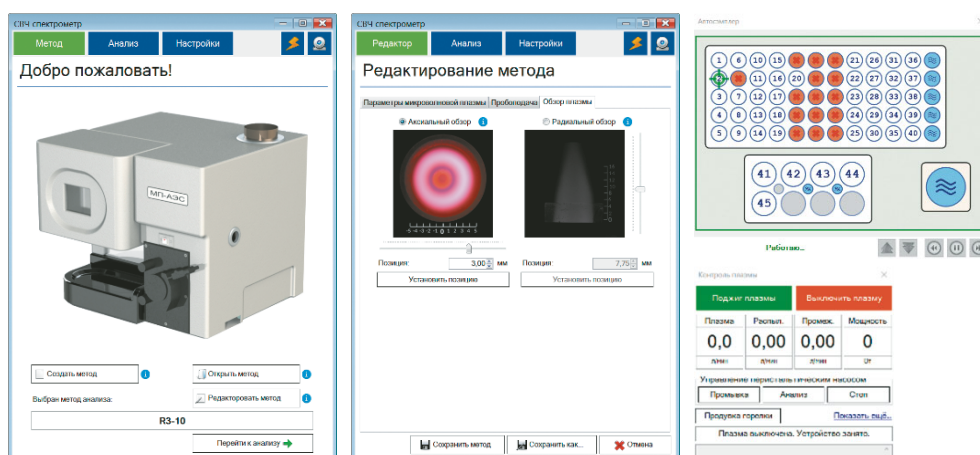


Рис. 4. Модуль управления микроволновой плазмой «СВЧ спектрометр»

Fig. 4. “Microwave spectrometer” module for controlling microwave plasma

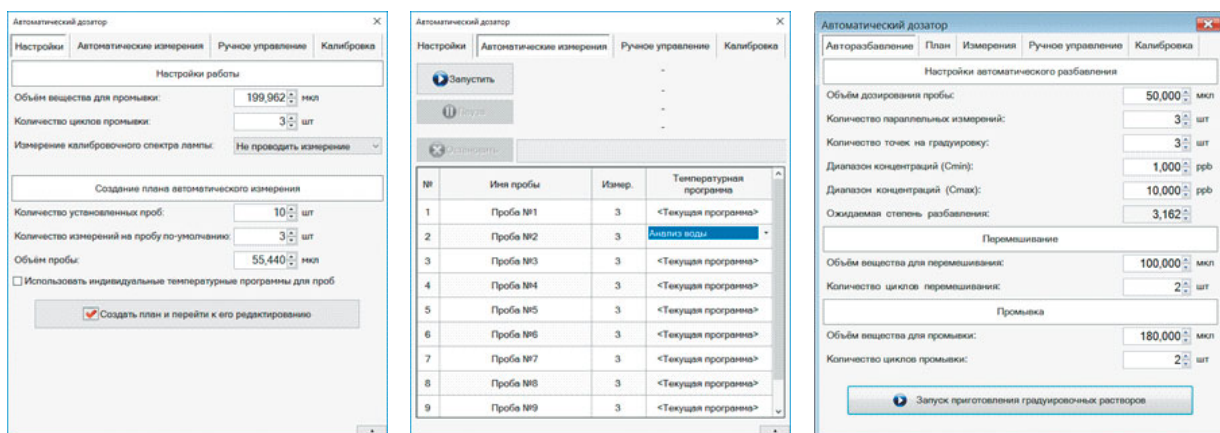


Рис. 5. Модуль «Автоматический дозатор»

Fig. 5. "Autosampler" module

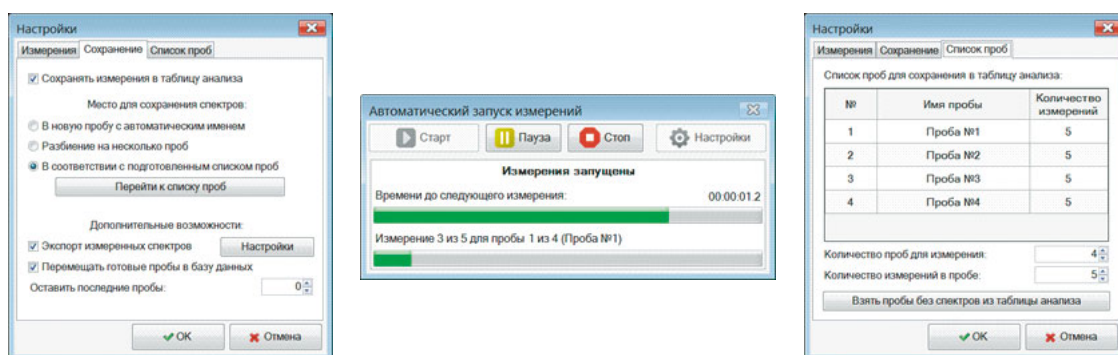


Рис. 6. Модуль «Автоматические измерения»

Fig. 6. "Automatic measurements" module

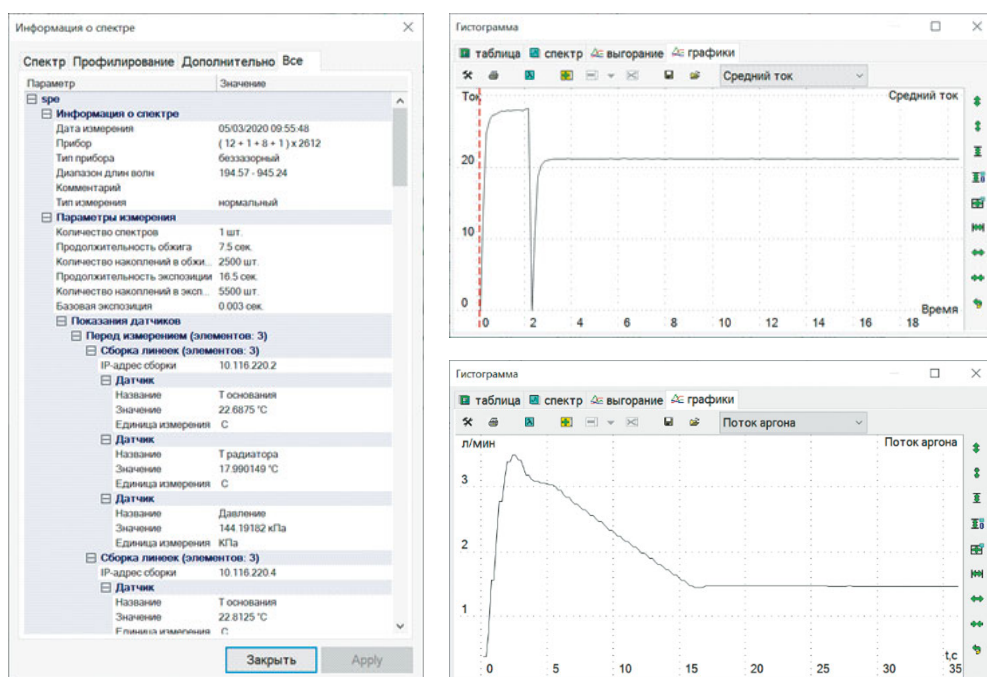


Рис. 7. Записанные значения и графики параметров

Fig. 7. Recorded values and graphs of parameters

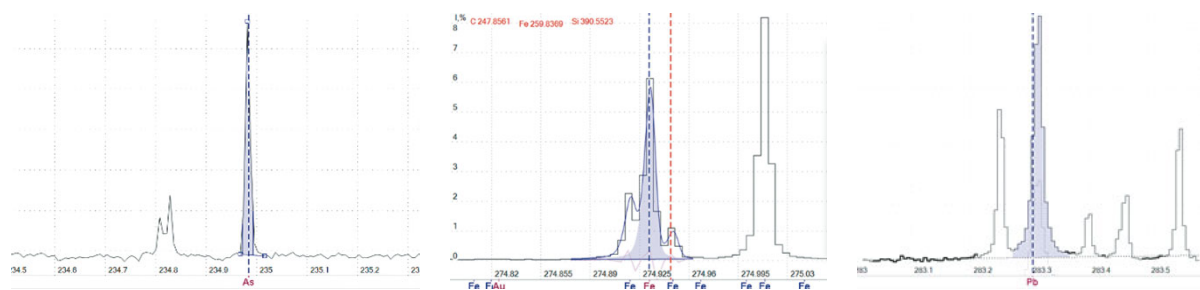


Рис. 8. Различные варианты вычисления интенсивности линии

Fig. 8. Various options for calculating the line intensity

Палладий 2016

в соответствии с МИХА № 012-C-2016

Разрешить редактировать

Переименовать

Н1 4 Н2 2

Элем	(C min)	C max	Δ	CR(N1)	CR(N1+N2)	δ st	R lab	Комментарий
Ag	0.0004	0.0005	0.00016	0.0004	0.00044	0.00016	0.00018	
Ag	0.0005	0.0007	0.00022	0.00053	0.00059	0.00022	0.00024	
Ag	0.0007	0.001	0.0003	0.0007	0.0008	0.0003	0.0003	
Ag	0.001	0.0015	0.0006	0.0011	0.0012	0.0006	0.0008	
Ag	0.0015	0.002	0.0008	0.0015	0.0017	0.0008	0.001	
Ag	0.002	0.003	0.0011	0.0022	0.0025	0.0011	0.0014	
Ag	0.003	0.005	0.0017	0.0033	0.0037	0.0017	0.0021	
Ag	0.005	0.007	0.003	0.005	0.005	0.003	0.004	
Ag	0.007	0.01	0.004	0.006	0.007	0.004	0.005	
Al	0.0007	0.001	0.0003	0.0007	0.0008	0.0003	0.0003	
Al	0.001	0.0015	0.0006	0.0011	0.0012	0.0006	0.0008	
Al	0.0015	0.002	0.0008	0.0015	0.0017	0.0008	0.001	
Al	0.002	0.003	0.0011	0.0022	0.0025	0.0011	0.0014	

базовый ГОСТ Р ИСО 5725 результат

Рис. 9. Режим «Нормативы»

Fig. 9. "Standards" mode

Результат оперативного контроля погрешности

элемент	C	Cco	C-Cco	δ st	результат
Лист 1					
Ag	338.289	0.0082	0.00786	0.00034	0.0025 Удовл.
Al	309.2708	0.018	0.0161	0.0019	0.003 Удовл.
Au	312.2784	0.024	0.0311	0.0071	0.003 Неуд.
Bi	306.772	0.0072	0.00781	0.00061	0.0025 Удовл.
Ca	317.9332	0.017	0.0157	0.0013	0.003 Удовл.
Ca	396.8469	0.018	0.0157	0.0023	0.003 Удовл.
Fe	296.6898	0.033	0.0313	0.0017	0.004 Удовл.
Fe	302.1073	0.032	0.0313	0.0007	0.004 Удовл.
Fe	304.7605	0.033	0.0313	0.0017	0.004 Удовл.
Ir	292.479	0.036	0.0312	0.0048	0.01 Удовл.
Ir	322.078	0.036	0.0312	0.0048	0.01 Удовл.
Mg	277.9829	0.019	0.0156	0.0034	0.005 Удовл.
Mg	279.5528	0.017	0.0156	0.0014	0.005 Удовл.

повторяемость

OK 24 не удовл. 11
всего 37 не вычислен 2

Отчет

< Back Finish Help

Рис. 10. Оперативный контроль погрешности

Fig. 10. On-line error monitoring

нологических процессов производства. Значения интенсивности в спектре измеряются с заданной периодичностью, записываются в базу данных и экспортируются в систему контроля предприятия.

Устойчивость результатов измерений обеспечивается стабилизацией и коррекцией таких параметров, как температура приемников излучения, калибровка по длинам волн, уровень темного сигнала, спектр источника излучения.

Наряду со спектром сохраняются все заданные параметры измерения, показания датчиков, значения коррекций, записанные графики и изображения, а также калибровочные сигналы — темновой сигнал, спектр излучения источника (для спектров пропускания или поглощения) и спектр контрольного опыта, что обеспечивает прослеживаемость результатов измерений (рис. 7).

Вычисление результатов

При занесении спектра в таблицу анализа выполняется расчет аналитических сигналов и содержаний заданных химических элементов. Первый этап — анализ окружения каждой спектральной линии из таблицы анализа и вычисление интенсивности за вычетом фонового излуче-

ния и мешающих линий (рис. 8). Второй этап — вычисление аналитической интенсивности с учетом внутреннего стандарта и коэффициентов межэлементных влияний и определение содержания по ранее построенной градуировочной зависимости. Последний этап — объединение результатов определения элемента по нескольким аналитическим линиям.

В таблице анализа приведены рассчитанные статистические показатели: среднее значение, медиана, размах, среднееквадратическое отклонение, доверительный интервал, повторяемость и погрешность. Контроль точности и прецизионности результатов измерений осуществляется по заданным нормативным значениям из методики измерения согласно ГОСТ Р ИСО 5725 (рис. 9).

Результат оперативного контроля погрешности измерений (рис. 10) можно вывести на печать в виде отдельной формы отчета.

Программа «Атом» позволяет задавать параметры вычислений, в том числе список анализируемых линий, для достижения оптимальных результатов без проведения повторных измерений. Такая возможность особенно ценна на этапе от-

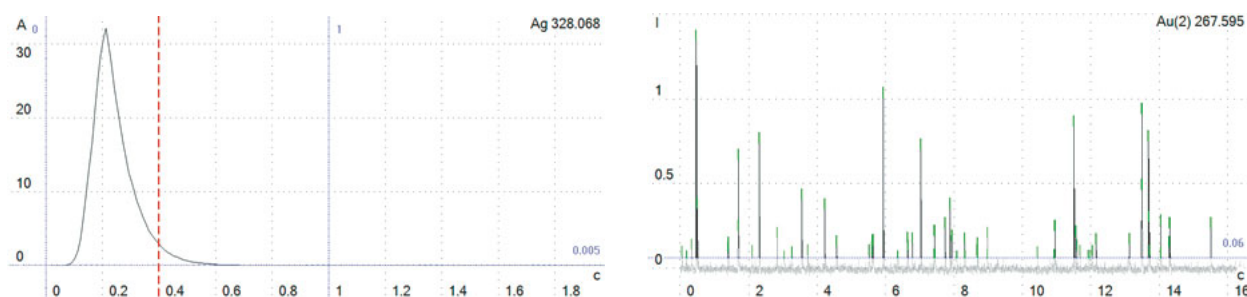


Рис. 11. Зависимость интенсивности от времени (абсорбция и сцинтилляция)

Fig. 11. The intensity dependence versus time (absorption and scintillation)

Элемент	Концентрация (оценка)
Pt (Платина)	1.3 %
Au (Золото)	0.11 %
Ni (Никель)	0.075 %
Ca (Кальций)	0.059 %
Al (Алюминий)	0.058 %
Rh (Родий)	0.046 %
Pd (Палладий)	0.045 %
Fe (Железо)	0.042 %
Mg (Магний)	0.026 %
Ru (Рутений)	0.026 %
Zn (Цинк)	0.02 %
Si (Кремний)	0.02 %
Mn (Марганец)	0.018 %
Pb (Свинец)	0.015 %
Sb (Сурьма)	0.0093 %
Ir (Иридий)	0.0057 %
Cu (Медь)	0.0048 %

Рис. 12. Полуколичественный анализ

Fig. 12. Semi-quantitative analysis

ладки новой методики или в случае выполнения нестандартного анализа.

Методы спектрального анализа

В ПО «Атом» представлено несколько методов спектрального анализа:

- 1) атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС);
- 2) сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектрометрия (САЭС) [5 – 7, 10];
- 3) атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) с источником непрерывного спектра [11];
- 4) определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектрометрии с искровым возбуждением спектра [8];
- 5) количественный молекулярный спектральный анализ (МСА) по спектрам поглощения — спектрофотометрия [15].

Возможность эффективной работы с использованием спектральных методов с временным разрешением (САЭС, ААС, анализ неметаллических включений) обеспечивается использованием современной 64-битной архитектуры с распределением данных и потоков выполнения на все вы-

числительные ядра процессора (рис. 11). Часть программы, работающая в режиме реального времени, реализована напрямую в командах процессора (набор инструкций SSE4.2) с использованием векторизованных версий алгоритмов.

В виде отдельных дополнительных инструментов предложены методики качественного и полуколичественного анализа (рис. 12): метод появления и усиления линий; метод трех линий; метод кросс-корреляционного качественного анализа.

Интерфейс пользователя

Отличительной особенностью ПО «Атом» является продуманный интерфейс пользователя, позволяющий с высокой производительностью работать с любым современным спектроаналитическим комплексом. Основные возможности программы сгруппированы в нескольких разделах:

- 1) «главное окно» — базовые и универсальные функции, реализованные в окнах спектра, градуировочного графика и таблицы анализа;
- 2) «инструменты» — дополнительные и специализированные функции (например, «Качественный анализ», «Мешающие линии», «Диаграмма содержаний», «Поиск аналитических линий»);
- 3) отдельные «режимы» работы программы, например, «Лаборант», «Отчет», «Профилирование», «Образцы сравнения», «Нормативы», «База данных результатов анализа».

Удобство, простота и эргономичность интерфейса достигаются с помощью оригинальных элементов: такие компоненты, как график, спектр, градуировочный график, таблица анализа, являются собственными разработками компании. Многие стандартные элементы управления были значительно дополнены и усовершенствованы — контекстное меню, кнопка, окно сообщений, всплывающая подсказка, комбинированный выпадающий список (рис. 13).

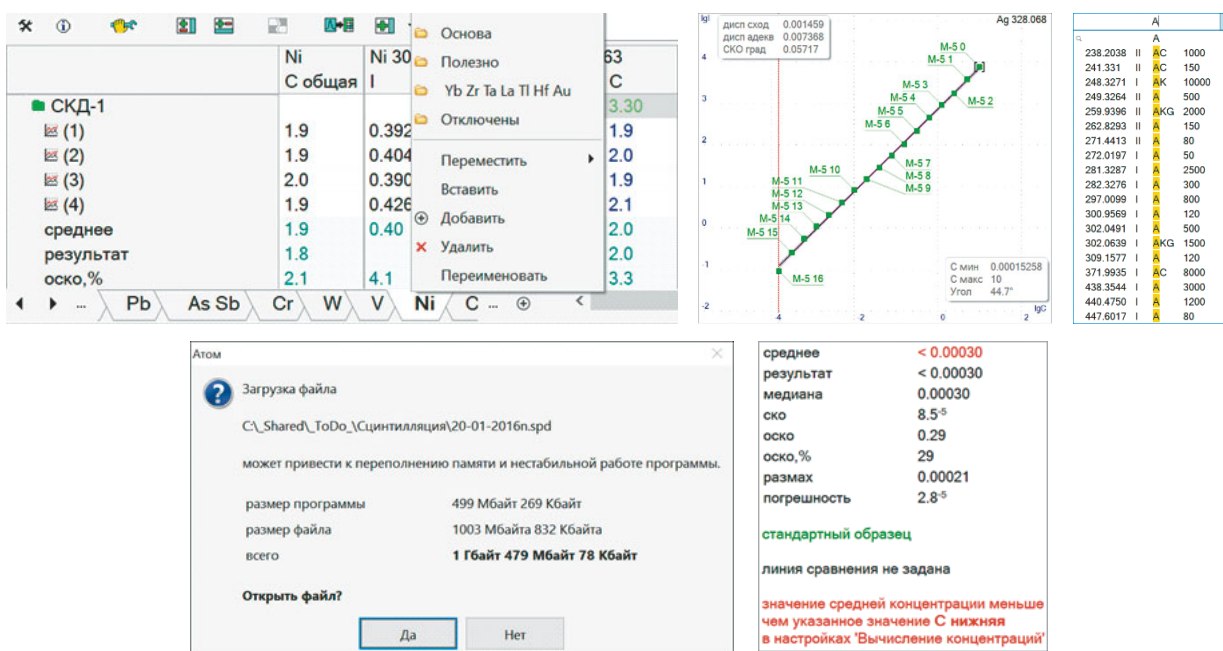


Рис. 13. Элементы интерфейса: таблица анализа с закладками и контекстным меню, градуировочный график, табулированный выпадающий список со встроенным поиском, окно сообщений, всплывающая подсказка

Fig. 13. The interface elements: analysis Table with tabs and context menu, calibration graph, tabulated drop-down list with built-in search, message box, and tooltip

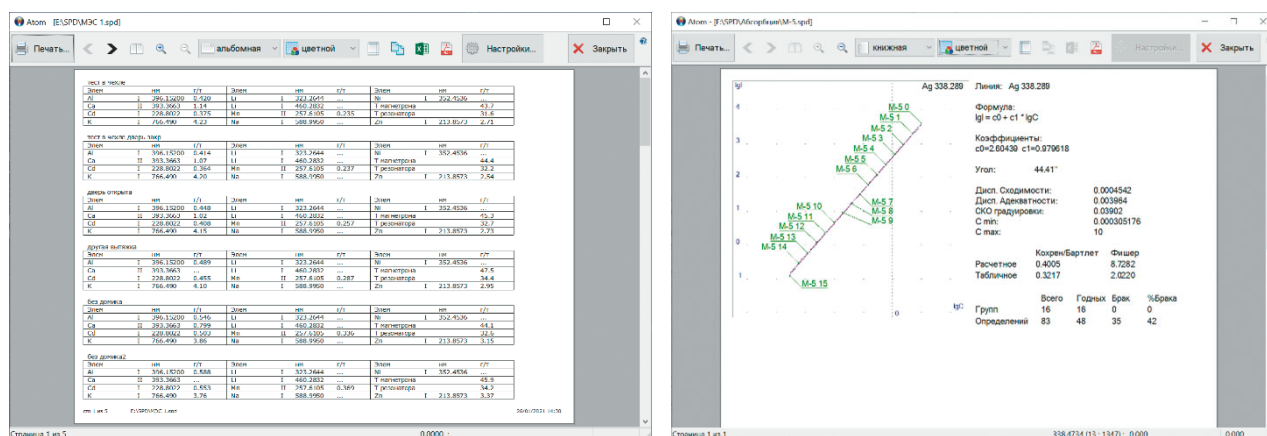


Рис. 14. Стандартный отчет, печать градуировочного графика

Fig. 14. Standard report and printing of a calibration graph

Отчеты и экспорт

Вывод на печать предлагает различные варианты компактных и расширенных представлений результатов в виде отчетов — «Стандартный отчет» и «Печать градуировочного графика» (рис. 14), «Градуировочные графики», «Сцинтилляция», «Оперативный контроль погрешности» (рис. 15), «Печать спектра», отчет режима «Анализ» базы данных результатов анализа. Реализован полнофункциональный режим предварительного просмотра перед печатью. Отчет может быть сохранен в виде отдельного файла в формате PDF (Portable Document Format), в том чис-

ле в автоматическом режиме после вывода на печать.

Табличные формы отчетов могут передаваться в программу Microsoft Excel. Применяя XLS-файл в качестве шаблона, можно сформировать отчет с использованием возможностей пакета Microsoft Office.

Развитые средства экспорта данных позволяют не только организовать передачу результатов во внешние информационные системы, но и расширяют функциональные возможности программы, опираясь на взаимодействие с другими приложениями:

Рис. 15. Результат оперативного контроля погрешности измерений в виде отчета в Excel

Fig. 15. The result of on-line measurement error monitoring in the form of an Excel report

1) копирование в буфер обмена (рис. 16) предоставляет стандартный способ переноса информации из таблицы анализа в любое другое приложение;

2) генерация отчетов в Microsoft Excel (см. рис. 15) решает не только задачу оформления перед печатью, но и дает возможность организовать нестандартную обработку и метрологический контроль результатов анализа;

3) экспорт результатов в формате XML (eXtensible Markup Language) — современный универсальный способ автоматической передачи данных в любую информационную систему, например, в базу данных предприятия (см. рис. 16);

4) передача данных в среду «Matlab» используется инженерами предприятия для разработки экспериментальных алгоритмов;

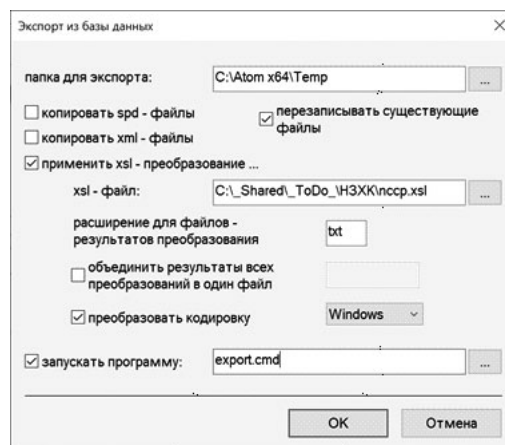
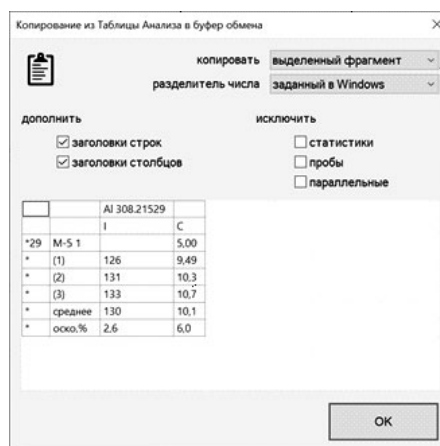


Рис. 16. Копирование из таблицы анализа в буфер обмена, настройки автоматического экспорта результатов

Fig. 16. Copying from the analysis Table to the clipboard and automatic data export settings

5) взаимодействие с Python дает возможность вести разработку модулей программы на высокоуровневом языке программирования общего назначения с использованием обширных библиотек алгоритмов, математических методов и компонентов интерфейса.

Рис. 17. Марочник и база данных спектральных линий

Fig. 17. Alloy grade guide and database of spectral lines

Дополнительные возможности

Комплект поставки программного пакета «Атом» содержит вспомогательные информационные системы: база данных спектральных линий и марочник сплавов (рис. 17), каталог стандартных образцов с аттестованными содержаниями элементов, а также база данных нормативных значений метрологических характеристик методов измерения (см. рис. 9).

Стоит отдельно отметить некоторые оригинальные разработки компании в рамках ПО «Атом»: автоматическая калибровка спектрального комплекса по длинам волн [16] (рис. 18); оснащение приборов видеокамерами; возможность применения сканера штрих-кода для автоматизации ввода идентификаторов проб.

Программа построена по модульной архитектуре, отдельные модули выполнены с помощью различных технологий — Assembler, C, Win API, C++, COM, MFC, C#, WinForms, WPF, Python. Такая гетерогенная структура проекта потребовала построения развитых средств развертывания программного обеспечения: автоматизированная система сборки, инсталлятор, отслеживание и обновление версий, тестирование на совместимость, самодиагностика и конфигуратор приложения (рис. 19).

Заключение

Таким образом, показаны основные особенности и преимущества программы «Атом», а также главные достижения последних нескольких лет разработки.

Так, выпуск 64-битной версии программы позволил снять ограничение на объем регистрируемых последовательностей спектров и существенно ускорить их обработку, что особенно важно в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии и при определении неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искро-

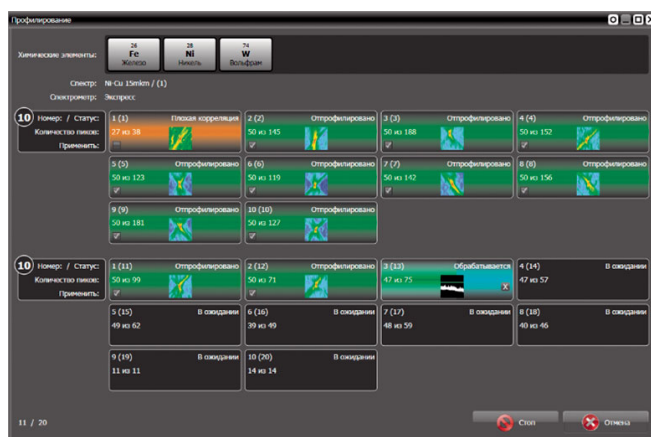


Рис. 18. Процесс автоматической калибровки по длинам волн

Fig. 18. Process of automatic wavelength calibration

вым возбуждением спектра. Создание атомно-абсорбционных спектрометров с анализаторами МАЭС, спектрометров с микроволновой плазмой и индуктивно-связанной плазмой, оснащение спектрометров автодозаторами, видеокамерами и другими дополнительными устройствами требовали разработки и внедрения соответствующих инструментов и модулей.

ПО «Атом» является важной частью спектрального аналитического комплекса, и его развитие расширяет аналитические возможности комплекса в целом.

ПО «Атом» разрабатывают высококвалифицированные специалисты с применением передовых технологий. Современная модульная архитектура программы позволяет эффективно управлять сложностью проекта и вести независимую разработку отдельных компонент с использованием наиболее подходящих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабузов В. А., Гаранин В. Г., Шелпакова И. Р. Многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров. Сове-

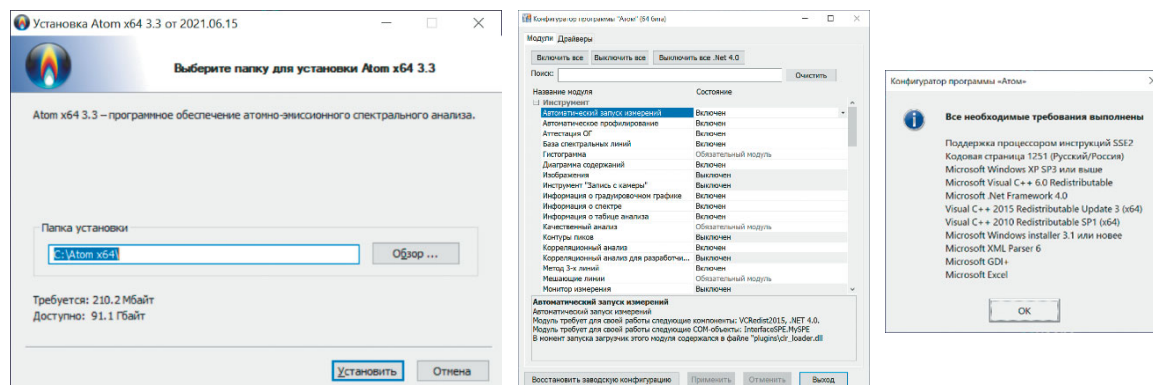


Рис. 19. Инсталлятор; конфигуратор; тестирование на совместимость

Fig. 19. Installer; configurator; testing for compatibility

- менное состояние и аналитические возможности / Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67. № 7. С. 697 – 707.
2. **Путьмаков А. Н., Попов В. И., Лабусов В. А., Борисов А. В.** Новые возможности модернизированных спектральных приборов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Спецвыпуск. С. 26 – 28.
 3. **Лабусов В. А., Гаранин В. Г., Зарубин И. А.** Новые спектральные комплексы на основе анализаторов МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 15 – 20. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-15-20
 4. **Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др.** Программное обеспечение атомного спектрального анализа «Атом» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 103 – 111. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
 5. **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.
 6. **Шевелев Г. А., Василенко Л. И., Каменская Э. Н. и др.** Благородные и редкие металлы в некоторых месторождениях угля Казахстана / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 38 – 45. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
 7. **Дзюба А. А., Лабусов В. А., Васильева И. Е. и др.** Аналитические возможности спектрального комплекса «Гранд-Поток» при сцинтилляционном определении содержания золота и серебра в геологических пробах / Аналитика и контроль. 2017. Т. 21. № 1. С. 6 – 15. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
 8. **Бокк Д. Н., Лабусов В. А.** Определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 5 – 19. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-5-19
 9. **Бабин С. А., Селюнин Д. О., Лабусов В. А.** Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. 2. С. 96 – 102. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102
 10. **Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А.** Анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии / Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 1. С. 35 – 42. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.005
 11. **Labusov V. A., Boldova S. S., Selyunin D. O., et al.** High-resolution continuum-source electrothermal atomic absorption spectrometer for simultaneous multi-element determination in the spectral range of 190 – 780 nm / J. Anal. At. Spectrom. 2019. Vol. 34. P. 1005 – 1010. DOI: 10.1039/c8ja00432c
 12. **Пелипасов О. В., Лабусов В. А., Путьмаков А. Н. и др.** Спектрометр с микроволновой плазмой «Гранд-СВЧ» для атомно-эмиссионного анализа / Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 1. С. 24 – 34. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.004
 13. **Пелипасов О. В., Лабусов В. А., Путьмаков А. Н.** Атомно-эмиссионные спектрометры с азотной микроволновой плазмой. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. — 211 с. <http://www.vmk.ru/publications.html> (дата обращения 9.10.2021)
 14. **Пелипасов О. В., Лохтин Р. А., Лабусов В. А., Пелевина Н. Г.** Аналитические возможности спектрометра «Гранд» при анализе растворов с использованием индуктивно-связанной плазмы / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 82 – 85. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-82-85
 15. **Булатов М. И., Калинин И. П.** Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. — Л.: Химия, 1986. — 432 с.
 16. **Панкратов С. В., Лабусов В. А., Неклюдов О. А., Ващенко П. В.** Автоматическая градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 128 – 134.

REFERENCES

1. **Labusov V. A., Garanin V. G., Shelpakova I. R.** Multi-channel analyzers of atomic emission spectra: Current state and analytical potentials / J. Anal. Chem. 2012. Vol. 67. N 7. P. 632 – 641. DOI: 10.1134/S1061934812070040
2. **Putmakov A. N., Popov V. I., Labusov V. A., Borisov A. V.** New possibilities of modernized spectral instruments / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 26 – 28 [in Russian].
3. **Labusov V. A., Garanin V. G., Zarubin I. A.** New Spectral Complexes Based on MAES Analyzers / Inorg. Mater. 2018. Vol. 54. N 14. P. 1443 – 1448. DOI: 10.1134/S0020168518140133
4. **Garanin V. G., Neklyudov O. A., Petrochenko D. V., et al.** «Atom» software for atomic spectral analysis / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 103 – 111 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
5. **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].
6. **Shevelev G. A., Vasilenko L. I., Kamenskaya E. N., et al.** Noble and rare metals in some coal deposits of Kazakhstan / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 38 – 45 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
7. **Dzyuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. E., et al.** Analytical capabilities of «Grand-Potok» spectral system for the scintillation determination of gold and silver in geological samples / Analit. Kontrol'. 2017. Vol. 21. N 1. P. 6 – 15 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
8. **Bock D. N., Labusov V. A.** Determination of Nonmetallic Inclusions in Metal Alloys by the Method of Spark Atomic Emission Spectroscopy (Review) / Inorg. Mater. 2019. Vol. 55. N 14. P. 1415 – 1427. DOI: 10.1134/S0020168519140012
9. **Babin S. A., Selyunin D. O., Labusov V. A.** High-Speed Multichannel MAES Analyzers Based on BLPP-2000 and BLPP-4000 Photodetector Arrays / Inorg. Mater. 2020. Vol. 56. N 14. P. 1431 – 1435. DOI: 10.1134/S0020168520140022
10. **Dzyuba A. A., Labusov V. A., Babin S. A.** Testing of MAES analyzers with BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector linear arrays in a «Grand-Potok» spectral system / Analit. Kontrol'. 2019. Vol. 23. N 1. P. 35 – 42 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.005
11. **Labusov V. A., Boldova S. S., Selyunin D. O., et al.** High-resolution continuum-source electrothermal atomic absorption spectrometer for simultaneous multi-element determination in the spectral range of 190 – 780 nm / J. Anal. At. Spectrom. 2019. Vol. 34. P. 1005 – 1010. DOI: 10.1039/c8ja00432c
12. **Pelipasov O. V., Labusov V. A., Put'makov A. N., et al.** GRAND-MP — microwave plasma-atomic emission spectrometer / Analit. Kontrol'. 2019. Vol. 23. N 1. P. 24 – 34 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.004
13. **Pelipasov O. V., Labusov V. A., Putmakov A. N.** Atomic emission spectrometers with nitrogen microwave plasma. — Novosibirsk: Izd. NSTU, 2021. — 211 p. [in Russian]. <http://www.vmk.ru/publications.html> (accessed October 9, 2021).
14. **Pelipasov O. V., Lokhtin R. A., Labusov V. A., Pelevina N. G.** Analytical Capabilities of a Grand Spectrometer in Analysis of Solutions Using Inductively Coupled Plasma / Inorg. Mater. 2020. Vol. 56. N 14. P. 1446 – 1449. DOI: 10.1134/S0020168520140113
15. **Bulatov M. I., Kalinkin I. P.** A practical guide to photometric methods of analysis. — Leningrad: Khimiya, 1986. — 432 p. [in Russian].
16. **Pankratov S. V., Labusov V. A., Neklyudov O. A., Vashchenko P. V.** Automatic Wavelength Calibration of the Spectrometers with MAES Analyzers (Profiling) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 128 – 134 [in Russian].