

Анализ вещества

УДК 543.423

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХСТРУЙНОГО ПЛАЗМАТРОНА¹

© А. В. Купцов², А. И. Сапрыкин^{2,3}, С. Б. Заякина⁴, А. А. Дзюба⁵*Статья поступила 21 октября 2016 г.*

Проведена оценка аналитических возможностей нового спектрального комплекса, состоящего из спектрометра «Гранд» с высокоскоростным анализатором спектров МАЭС и двухструйного дугового плазматрона «Факел». Найдены оптимальные условия возбуждения и регистрации сцинтилляционных спектров и выбраны способы их обработки. Разработана методика определения валового содержания благородных металлов в геологических образцах методом сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа с использованием двухструйного дугового плазматрона. Пределы обнаружения Au, Pt, Pd и Ag составили $2 \cdot 10^{-4}$, $9 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-3}$ и $9 \cdot 10^{-4}$ г/т соответственно.

Ключевые слова: двухструйный дуговой плазматрон; сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ; геологические образцы; благородные металлы.

Благородные металлы (БМ) находят широкое применение в различных сферах деятельности (электроника, ювелирная и химическая промышленность и т.д.). Ввиду того что самые богатые месторождения уже практически выработаны, определение низких содержаний БМ в геологических объектах приобретает все большую актуальность. Кларки этих элементов в земной коре составляют 10^{-6} – 10^{-7} %. Большинство инструментальных методов не способны обеспечить такие пределы обнаружения при прямом анализе без применения разделения и концентрирования. Поэтому методы, не требующие длительной пробоподготовки, становятся все более востребованными. Одним из таких методов является метод сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа (СЭСА), основанный на регистрации последовательности спектров во времени (спектров выгорания) при возбуждении порошков в дуговом разряде. Для ввода пробы обычно используют метод «вдувания-просыпки», источником возбуждения служит дуга постоянного или переменного тока (ДПТ) [1, 2]. В настоящей работе в качестве источника возбуждения спектров применяли двух-

струйный дуговой плазматрон «Факел» (ДДП), описанный в работе [3], мощностью до 15 кВт. Более высокая мощность и стабильность плазматрона по сравнению с дугой постоянного тока позволит снизить пределы обнаружения золота, серебра, палладия и платины до уровня их кларковых содержаний в земной коре.

Цель работы — оценка аналитических возможностей спектрального комплекса, состоящего из ДДП и спектрометра «Гранд» с высокоскоростным анализатором эмиссионных спектров, выбор условий возбуждения и регистрации сцинтилляционных спектров, исследование возможности использования единого набора стандартных образцов на основе графитового порошка (ГП) при построении градуировочных зависимостей для определения валовых содержаний золота, серебра, платины и палладия в порошковых пробах горных пород, руд и продуктов их переработки методом ДДП-СЭСА.

Оборудование и реактивы. В работе использовали плазматрон «Факел» и спектрометр «Гранд» [4], в который был установлен модернизированный многоканальный анализатор эмиссионных спектров МАЭС с гибридной сборкой на основе линеек фотодиодов БЛПП-369М1 и БЛПП-2000 [3, 5], позволяющих работать с временами экспозиции до 3 мс. 12 линеек БЛПП-369М1 охватывают спектральный диапазон от 180 до 360 нм. Дополнительная высокочувствительная линейка БЛПП-2000 охватывает диапазон от 255 до 280 нм, в который входят две аналитические линии Au 267,595 нм и Pt 265,945 нм.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту КПФИ РАН II.2П/V.45-2.

² Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: kuptsov@niic.nsc.ru

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия.

⁴ Институт геологии и минералогии им. акад. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

⁵ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

Таблица 1. Список стандартных образцов, используемых в работе

Образец		Аттестованное содержание, г/т			
Название	Тип	Au	Ag	Pd	Pt
PВЗ-8	Сульфидная медно-никелевая руда	0,21 ± 0,02	1,6 ± 0,1	4,9 ± 0,2	1,8 ± 0,1
PBM-6	Сульфидная медно-никелевая руда	0,41 ± 0,01	7,0 ± 0,3	6,8 ± 0,2	2,5 ± 0,1
PMO-5	Сульфидная медно-никелевая руда	1,4 ± 0,1	22,8 ± 0,7	16,0 ± 0,4	4,2 ± 0,1
ШТ-1	Штейн рудно-термической плавки	1,62 ± 0,16	41,45 ± 3,46	51,50 ± 2,60	16,60 ± 1,50
СЗР-3	Золотосодержащая руда	4,25 ± 0,11	0,71 ± 0,01	—	—
СЗР-4	Золотосодержащая руда	2,13 ± 0,05	0,36 ± 0,01	—	—
СЗК-3	Флотоконцентрат золотосодержащей руды	34 ± 1	5,7 ± 0,3	—	—
СЗХ-3	Хвосты флотации золотосодержащей руды	0,9 ± 0,1	0,31 ± 0,02	—	—
СЧС-1	Черный сланец	0,10 ± 0,02	0,10 ± 0,02	—	—
КП-1*	Концентрат платиновый	3,05 ± 0,05	13,43 ± 0,05	46,86 ± 0,10	12,32 ± 0,03
СОГ-13-4	Графитовый коллектор микропримесей	1,01 ± 0,12	1,01 ± 0,12	1,01 ± 0,12	1,01 ± 0,12
СГ-3	Щелочной агапитовый гранит	—	0,06	—	—
Кв-3	Кварцит	—	—	—	—

* Содержание БМ приведено в % масс.

Таблица 2. Значение нулевого порога, рассчитанного для разных образцов

Элемент	ГП + Ме	СГ-3	Кв-3	Среднее
Au 267,595	130	130	85	115
Pt 265,945	180	100	100	125
Pd 324,270	45	70	70	60
Pd 340,458	40	30	35	35
Ag 328,068	50	40	70	55
Ag 338,289	40	20	40	35

Для построения градуировочных графиков и проверки правильности методики использовали стандартные образцы с различным содержанием БМ и матричных компонентов (табл. 1).

Оптимизация условий возбуждения спектров. Известно, что конструкция плазменной горелки и такие параметры, как угол между электродами, расход плазмообразующего и транспортирующего газов, мощность дуги, оказывают сильное влияние на распределения температуры и интенсивностей спектральных линий аналитов по высоте плазменного факела, что сказывается на результатах количественного химического анализа (КХА). Для нахождения оптимальных условий возбуждения и зоны регистрации спектров применяли метод многофакторного математического планирования эксперимента. Подробно процедура оптимизации описана в работе [6]. В процессе математического планирования были найдены следующие оптимальные условия возбуждения и регистрации спектров: сила тока дуги — 95 А, угол между электродами — 70°, расход плазмообразующего газа — 3,5 л/мин, расход пробоподающего газа — 0,9 л/мин, высота аналитической зоны — 12 мм от основания факела.

На величину аналитического сигнала влияет скорость поступления пробы в плазму (количество частиц пробы, поступающих в плазму за 1 с), которая

зависит от скорости движения устройства пробоподачи — транспортной ленты в методе «вдувания-пропыски» в ДПТ [7] или искрового распылителя в ДДП. Для оптимизации процесса ввода пробы измеряли число зарегистрированных частиц БМ при разной скорости движения цилиндра с пробой в искровой распылитель. Наилучшие результаты были достигнуты при минимальной скорости 0,16 мм/с. Увеличение скорости движения цилиндра приводит к падению числа зарегистрированных частиц и увеличению стандартного отклонения s_r .

Оценка значения нулевого порога. В СЭСА используют нулевой порог интенсивности (Pr_0) [2, 8] — значение интенсивности аналитического сигнала, соответствующее сигналу пробы, не содержащей определяемый элемент. Эта величина позволяет исключить ложные сигналы при регистрации спектров (фоновый сигнал, шумы линейки). Для оценки величины нулевого порога была приготовлена смесь на основе спектрально чистого графитового порошка с добавлением основных матричных элементов в виде оксидов в концентрациях, примерно соответствующих их содержаниям в рудах (смесь содержала 20, 10, 1 и 1 % масс. Fe, Al, Ni и Ti соответственно), а также использовали стандартные образцы гранита СГ-3 и кварцита Кв-3. Регистрировали по четыре спектра для каждой аналитической линии. Расчет Pr_0 проводили по 3 σ -критерию для каждой спектральной линии, результаты приведены в табл. 2.

Построение градуировочных зависимостей и выбор алгоритма обработки сцинтилляционных спектров. Одной из основных проблем при анализе геологических объектов являются матричные влияния, поэтому для построения градуировочных графиков рекомендуется использовать стандартные образцы с матричным составом, адекватным составу исследуемых проб. Однако ввиду большого разнообразия геологических объектов не всегда есть возможность

подобрать адекватные стандартные образцы во всем диапазоне определяемых концентраций. Поэтому для построения градуировочных графиков использовали стандартный образец концентрата платинового КП-1, последовательно разбавленный спектрально чистым графитовым порошком. Для обработки сцинтилляционных спектров и корректировки матричных влияний использовали встроенные в программу «Атом» [9] алгоритмы обработки сцинтилляционных сигналов «базовый», «стабильный» [10] и «расширенный» [11]. Каждый из алгоритмов использует различные методы нахождения интенсивности спектральной линии и фона, и результатом их работы является повышение отношения сигнал/шум и получение зависимости интенсивности аналитической линии от времени. Алгоритм «базовый» использует для вычисления интенсивности фона точки перегиба в спектрах вблизи аналитических линий, алгоритмы «стабильный» и «расширенный» — математические модели, основанные на учете временного изменения фона вблизи аналитических линий. Эффективность работы алгоритмов оценивали путем анализа стандартных образцов состава руд с различным содержанием определяемых и матричных элементов (табл. 3 – 6).

Полученные данные позволили сделать следующие выводы.

1. При определении Au и Pt по линиям Au 267,595 нм и Pt 265,945 нм наиболее близкие к аттестованным значениям результаты были получены с использованием алгоритма «расширенный». Относительная погрешность не превышала 30 % для Au и 50 % для Pt. Использование алгоритма «базовый» приводит к систематическому занижению результатов (см. табл. 3, 4).

2. Для Pd и Ag наиболее близкие к аттестованным значениям результаты были получены с использовани-

ем алгоритма «базовый» по линиям Pd 340,458 нм и Ag 338,289 нм. Относительная погрешность не превышала 40 % для обоих элементов. При использовании алгоритмов «стабильный» и «расширенный» наблюдали систематическое завышение результатов ввиду наличия близко расположенных мешающих линий (см. табл. 5, 6).

Градуировочные графики, построенные с использованием выбранных алгоритмов, приведены на рис. 1. Как видно, линейный динамический диапазон составляет не менее четырех порядков величины концентрации. Для каждого из алгоритмов среднеквадратичное отклонение градуировочного графика не превышало 0,15, угол наклона был близок к 45°.

3. Результаты определения серебра с использованием каждого из алгоритмов были систематически

Таблица 3. Результаты определения валового содержания золота по линии Au 267,595 нм в СО

СО	Au, г/т	Режим		
		Базовый	Расширенный	Стабильный
РВЗ-8	0,21 ± 0,02	0,10 ± 0,06	0,21 ± 0,02	0,23 ± 0,02
РВМ-6	0,41 ± 0,01	0,20 ± 0,04	0,30 ± 0,10	0,32 ± 0,07
РМО-5	1,4 ± 0,1	0,47 ± 0,07	1,0 ± 0,2	1,0 ± 0,2
СЗР-3	4,25 ± 0,11	4,1 ± 0,5	4,6 ± 0,5	4,3 ± 0,4
СЗР-4	2,13 ± 0,05	2,2 ± 0,2	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,1

Таблица 4. Результаты определения валового содержания платины по линии Pt 265,945 нм в СО

СО	Pt, г/т	Режим		
		Базовый	Расширенный	Стабильный
РВЗ-8	1,8 ± 0,1	0,6 ± 0,3	1,3 ± 0,4	1,3 ± 0,4
РВМ-6	2,5 ± 0,1	0,6 ± 0,3	2,0 ± 0,4	1,7 ± 0,4
РМО-5	4,2 ± 0,1	1,1 ± 0,6	6,2 ± 2,2	6,4 ± 2,2
ШТ-1	16,6 ± 1,5	2,7 ± 0,5	19 ± 5	32 ± 2

Таблица 5. Результаты определения валового содержания серебра по линиям Ag 328,068 нм и Ag 338,289 нм в СО

СО	Ag, г/т	Режим					
		Базовый		Расширенный		Стабильный	
		328,068	338,289	328,068	338,289	328,068	338,289
РВЗ-8	1,6 ± 0,1	3,9 ± 0,5	1,5 ± 0,3	4,0 ± 0,5	3,8 ± 0,3	4,0 ± 0,5	4,1 ± 0,3
РВМ-6	7,0 ± 0,3	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9
РМО-5	22,8 ± 0,7	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9	>9,9
СЗР-3	0,72 ± 0,01	3,1 ± 0,5	1,0 ± 0,4	3,1 ± 0,5	1,5 ± 0,2	2,9 ± 0,4	2,0 ± 0,3
СЗР-4	0,36 ± 0,01	1,7 ± 0,2	0,46 ± 0,1	1,6 ± 0,2	0,46 ± 0,2	1,8 ± 0,2	1,0 ± 0,2

Таблица 6. Результаты определения валового содержания палладия по линиям Pd 340,458 нм и Pd 324,270 нм в СО

СО	Pd, г/т	Режим					
		Базовый		Расширенный		Стабильный	
		340,458	324,270	340,458	324,270	340,458	324,270
РВЗ-8	4,9 ± 0,2	5,0 ± 0,2	5,7 ± 0,7	9,5 ± 1,7	3,7 ± 1,6	12 ± 1	5,7 ± 2,2
РВМ-6	6,8 ± 0,2	6,8 ± 0,4	7,2 ± 0,7	18 ± 1	13 ± 3	19 ± 1	14 ± 2
РМО-5	16 ± 0,4	22 ± 3	22 ± 4	57 ± 3	56 ± 4	55 ± 5	52 ± 5
ШТ-1	51,5 ± 2,6	46 ± 3	57 ± 3	115 ± 10	145 ± 10	117 ± 6	135 ± 10

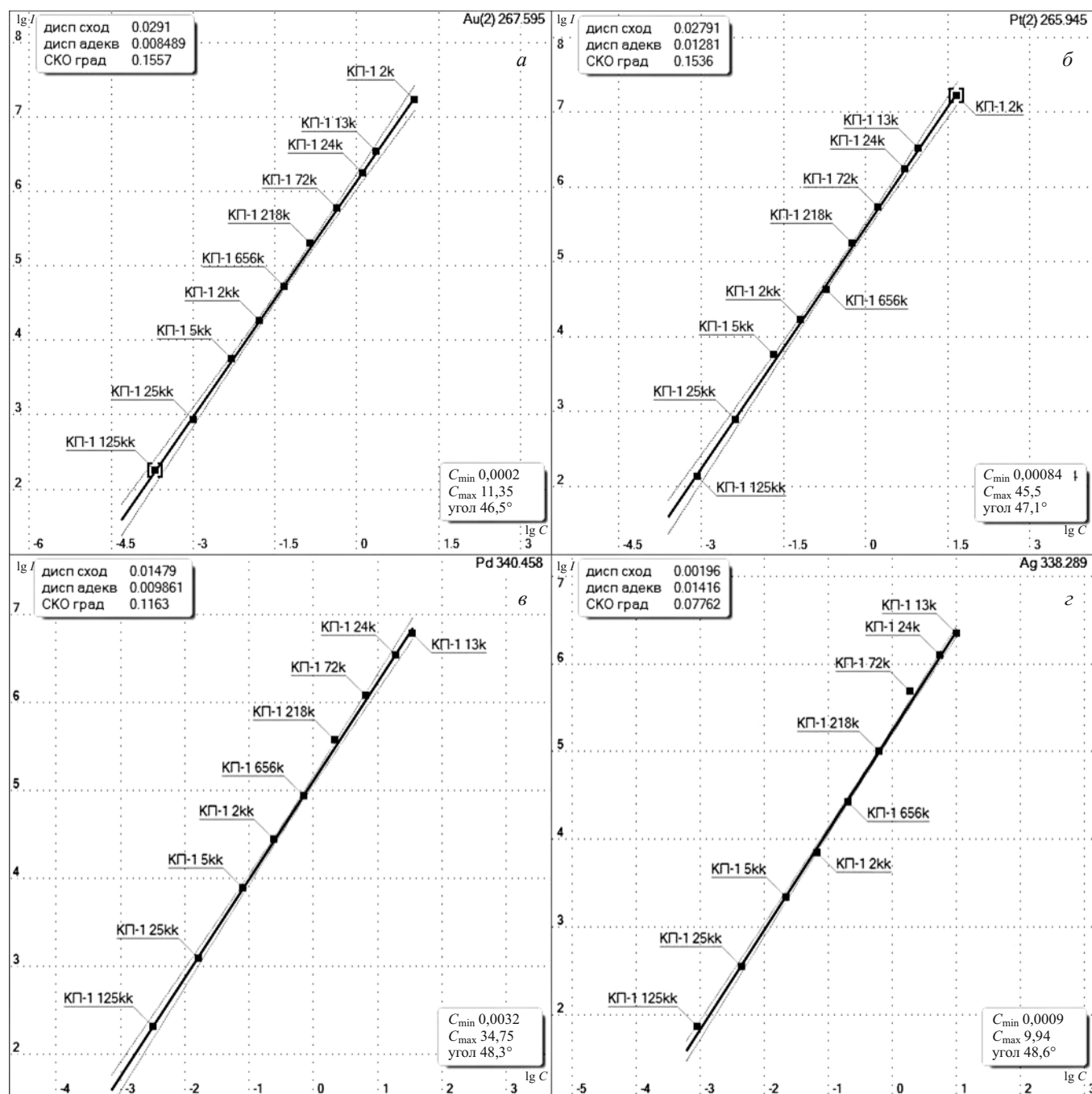


Рис. 1. Градуировочные графики для определения золота (а) (Au 267,595 нм), платины (б) (Pt 265,945 нм), палладия (в) (Pd 340,458 нм) и серебра (г) (Ag 338,289 нм), построенные с использованием стандартных образцов на основе ГП

завышенными. Повысить точность определения Ag удалось путем использования для построения градуировочных зависимостей стандартных образцов руд (рис. 2) и «расширенного» режима обработки (табл. 7).

В целом построение градуировочных графиков по стандартным образцам на основе графитового порошка показало свою эффективность. Большинство результатов хорошо согласуется с аттестованными значениями с учетом доверительных интервалов. Нижние границы определяемых содержаний ($C_{\min}$) по градуировочным графикам составили (г/т): для Au —

$2 \cdot 10^{-4}$, Pt — $9 \cdot 10^{-4}$, Pd — $3 \cdot 10^{-3}$, Ag — $9 \cdot 10^{-4}$, что ниже кларковых содержаний элементов в земной коре. В табл. 8 приведено сравнение нижних границ определяемых содержаний методами ДПТ-СЭСА и ДДП-СЭСА. Применение ДДП в качестве источника возбуждения позволило снизить нижние границы определяемых содержаний по Au, Ag и Pt более чем на порядок величины.

Изучение влияния матричных компонентов. Для изучения влияния матричных компонентов были приготовлены модельные смеси на основе стандартного образца концентрата платинового КП-1 с добавками

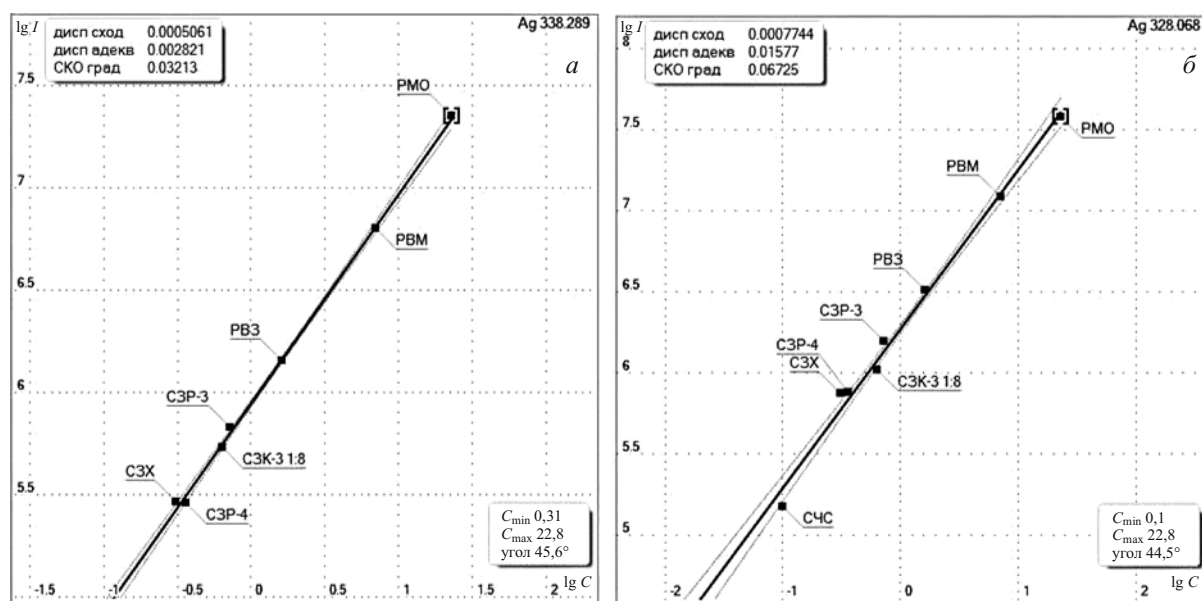


Рис. 2. Градуировочные графики для определения серебра по линиям 338,289 нм и 328,068 нм, построенные с использованием стандартных образцов руд

Таблица 7. Результаты определения валового содержания серебра в тестовой выборке по градуировочным графикам на основе СО руд

СО	Ag, г/т	Аналитическая линия, нм	
		328,068	338,289
PB3-8	1,6 ± 0,1	1,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1
PBM-6	7,0 ± 0,3	6,7 ± 0,3	6,8 ± 0,3
PMO-5	22,8 ± 0,7	21 ± 3	23 ± 3
C3P-3	0,72 ± 0,01	0,82 ± 0,13	0,76 ± 0,03
C3P-4	0,36 ± 0,01	0,40 ± 0,06	0,33 ± 0,04

Таблица 8. Нижние границы определяемых содержаний БМ методами ДДП-СЭСА и ДПТ-СЭСА

Элемент	ДДП-СЭСА, г/т	ДПТ-СЭСА, г/т	Кларк, г/т
Au	0,0002	0,004	0,004
Ag	0,0009	0,05	0,06
Pt	0,0009	0,03	0,005
Pd	0,003	0,001	0,01

основных рудных элементов в виде их оксидов (Fe, Ni, Co, Cu, Al, Cr, Si и Ti), а также исследованы стандартные образцы с разным матричным составом (см. табл. 1). Во всех случаях использовали выбранные ранее алгоритмы обработки спектров. Было отмечено значительное повышение фонового сигнала вблизи аналитических линий БМ для образцов с высоким содержанием Fe (>10 % масс.), Ni (>5 % масс.) и Co (>0,5 % масс.). Для образцов с алюмосиликатной основой повышение фона наблюдалось только при высоком содержании Al (>20 % масс.) вблизи линии Pt 265,945 нм. Значительного влияния силикатной основы на результаты анализа отмечено не было. В табл. 9 приведен список основных мешающих эле-

Таблица 9. Линии мешающих элементов и их содержания, с которых начинается влияние на результаты КХА

Элемент	Аналитическая линия, нм	Линия мешающего элемента, нм	Содержание, с которого начинается влияние, % масс.
Au	267,595	Co 267,598	0,5
		Cr 267,568	0,1
		Fe 267,616	10
Pt	265,945	Cr 265,947	0,1
		Fe 265,924	30
		Ni 265,945	5
		Al 266,039	20
Pd	324,270	Ni 324,306	5
		Ti 324,199	2
		340,458	
Ag	328,068	Co 340,512	1
		Cr 340,332	1
		Cu 328,069	0,1
		Mn 328,076	0,1
		338,289	
		Co 338,296	0,5
		Cr 338,268	0,5
		Ti 338,377	1

ментов с указанием концентрации, с которой начинается влияние на результаты анализа. При анализе образцов с содержанием мешающих компонентов выше приведенных в табл. 9 значений требуется разбавление пробы ГП.

Влияние массы частиц на точность результатов анализа. В литературе описано влияние массы (размера) частиц пробы на точность и сходимость результатов атомно-эмиссионного анализа. А. К. Русанов и А. С. Черевко [12, 13] отмечают снижение в большинстве случаев систематической погрешности и влияния минерального состава пробы при измельчении частиц пробы до размеров 3–5 мкм. В сцинтилляционном

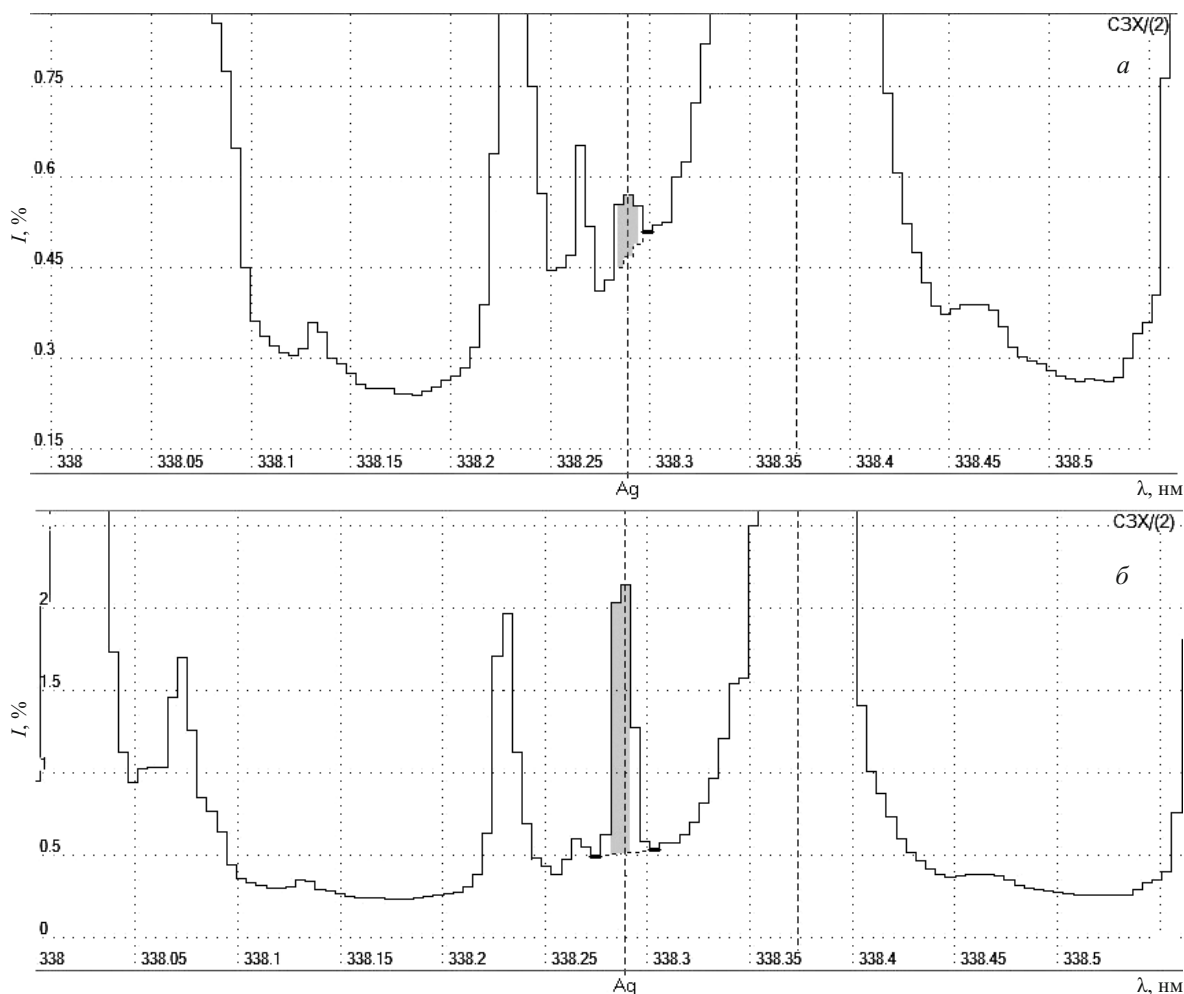


Рис. 3. Перекрывание пиков серебра разной интенсивности на линии Ag 338,289 нм мешающей линией Ti

спектральном анализе влияние массы (размера) частиц изучено мало. Ввиду того что в СЭСА регистрируется сигнал каждой отдельно взятой частицы, масса частиц может влиять на результаты определения БМ иным образом, чем в обычном атомно-эмиссионном (АЭС) анализе. Так, если в обычном АЭС анализе степень перекрывания пика зависит от содержания определяемого и мешающего компонентов, то в СЭСА степень перекрывания в большей степени будет зависеть не от суммарного содержания определяемого элемента, а от массы отдельных его частиц. На рис. 3 приведены примеры перекрывания пиков Ag разной интенсивности (от частиц разной массы) на линии 338,289 нм мешающей линией Ti.

Видно, что пик от малых частиц (см. рис. 3, а) перекрыт значительно сильнее, чем от частиц большой массы (см. рис. 3, б), что приводит к большой ошибке в результатах анализа, если образец в значительной степени состоит из частиц малой массы. Кроме того, введение нулевого порога в СЭСА накладывает ограничения на минимальную массу частиц БМ анализируемой пробы, которые могут быть зарегистрированы данным методом. Частицы, дающие сигнал ниже нулевого порога, не будут вносить вклад в суммарный

аналитический сигнал. Для определения минимальной массы частиц исследовали связь массы частицы и интенсивности эмиссионного сигнала. Среднюю массу частиц оценили для стандартного образца КП-1 по сцинтилляционным спектрам, в которых определяли количество зарегистрированных частиц. Далее, исходя из содержания каждого элемента, находили среднюю массу одной частицы (г): для Au — $1 \cdot 10^{-10}$, Pt — $3 \cdot 10^{-10}$, Pd — $2 \cdot 10^{-10}$, Ag — $2 \cdot 10^{-10}$.

Связь аналитического сигнала I и массы частицы определяли по градуировочным графикам (см. рис. 1). Используя значения нулевых порогов, рассчитанные выше (см. табл. 2), нашли минимальную массу частицы, которая составила: для Au — $2 \cdot 10^{-11}$, Pt — $6 \cdot 10^{-11}$, Pd — $3 \cdot 10^{-11}$, Ag — $3 \cdot 10^{-11}$ г. Кроме того, эти данные позволяют оценить теоретический предел обнаружения метода. Так как предел обнаружения элемента при сцинтилляционном способе анализа зависит от числа накапливаемых при регистрации импульсов и массы проанализированного материала, его можно оценить по значению $C_{\min}$, соответствующему одной вспышке, сигнал которой превышает нулевой порог. Таким образом, абсолютный предел обнаружения составляет: для Au — $2 \cdot 10^{-11}$, Pt — $6 \cdot 10^{-11}$, Pd —

$3 \cdot 10^{-11}$, Ag — $3 \cdot 10^{-11}$ г, что при навеске 0,1 г соответствует относительному пределу обнаружения Au $2 \cdot 10^{-8}$, Pt — $6 \cdot 10^{-8}$, Pd — $3 \cdot 10^{-8}$, Ag — $3 \cdot 10^{-8}$ г/г. Указанные значения для Au, Pt и Ag хорошо согласуются нижними границами определяемых концентраций, полученными нами (см. табл. 9). Это означает, что в процессе работы были практически достигнуты минимальные значения пределов обнаружения данным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Прокопчук С. И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии. — Иркутск: Институт геохимии СО РАН, 1994. — 64 с.
3. Лабузов В. А. Приборы и комплексы компании «ВМК-Оптоэлектроника» для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Современное состояние / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 12 – 21.
4. Лабузов В. А., Пут'маков А. Н., Зарубин И. А., Гаранин В. Г. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 7 – 13.
5. Бабин С. А., Лабузов В. А., Селюнин Д. О., Дзюба А. А. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 108 – 113.
6. Куцков А. В., Заякина С. Б., Сапрыкин А. И. Применение математического метода многофакторного планирования эксперимента для оптимизации условий атомно-эмиссионного определения благородных металлов с использованием дугового-двухструйного плазматрона / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 11. С. 15 – 19.
7. Шабанова Е. В., Васильева И. Е., Бусько А. Е., Кунаев А. Б. Оценка размера частиц золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением / Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 4. С. 186 – 200.
8. Райхбаум Я. Д. Физические основы спектрального анализа. — М.: Наука, 1980. — 159 с.
9. Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др. Программное обеспечение атомно-эмиссионного спектрального анализа (программа «Атом») / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 69 – 74.
10. Шаталов И. Г., Косых В. П., Лабузов В. А., Неклюдов О. А. Алгоритм обработки последовательности атомно-эмиссионных спектров во времени для снижения пределов обнаружения элементов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 7. С. 38 – 43.
11. Семенов З. В., Лабузов В. А., Неклюдов О. А., Ващенко П. В. Алгоритм обработки последовательности спектров для атомно-эмиссионного спектрального анализа / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 135 – 142.
12. Русанов А. К., Сердобова Л. И. О влиянии состава и дисперсности проб на результаты спектрального анализа с вдуванием порошков в плазму дуги / Журн. прикл. спектроскопии. 1971. Т. 14. Вып. 6. С. 963 – 968.
13. Черевко А. С., Юдеlevич И. Г., Попова В. П., Тагильцев А. П. Атомно-эмиссионный спектральный анализ порошков с использованием дугового двухструйного плазматрона / Журн. аналит. химии. 1988. № 3. С. 426 – 433.

REFERENCES

1. Shabanova E. V., Bus'ko A. E., Vasil'eva I. E. Dugovoi stintillyatsionnyi atomno-émissiionnyi analiz poroshkovykh prob pri ispol'zovanii MAES s vysokim vremennym razresheniem [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].
2. Prokopchuk S. I. Stintillyatsionnyi spektral'nyi analiz v geologii [Scintillation spectral analysis in geology]. — Irkutsk: Izd. Inst. geokhimii SO RAN, 1994. — 64 p. [in Russian].
3. Labusov V. A. Pribory i komplekсы kompanii «VMK-Optoelektronika» dlya atomno-émissiionnogo spektral'nogo analiza. Sovremennoe sostoyanie [Devices and systems for atomic emission spectroscopy produced by «VMK-Optoelektronika»: State-of-the-art] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. P. II. P. 12 – 21 [in Russian].
4. Labusov V. A., Put'makov A. N., Zarubin I. A., Garanin V. G. Novye mnogokanal'nye opticheskie spektrometry na osnove analizatorov MAES [New multichannel optical spectrometers based on MAES analyzers] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 7 – 13 [in Russian].
5. Babin S. A., Labusov V. A., Selyunin D. O., Dzyuba A. A. Bystrodeistvuyushchie analizatory MAES na osnove lineek BLPP-2000 [BLPP-2000 array based high-speed multichannel analyzers of atomic emission spectra] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 108 – 113 [in Russian].
6. Kuptsov A. V., Zayakina S. B., Saprykin A. I. Primenenie matematicheskogo metoda mnogofaktornogo planirovaniya éksperimenta dlya optimizatsii uslovii atomno-émissiionnogo opredeleniya blagorodnykh metallov s ispol'zovaniem dugovogo-dvukhstruynogo plazmatrona [Application of the mathematical method of multifactorial experiment to optimization of conditions of (TJP)-AES analysis] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 11. P. 15 – 19 [in Russian].
7. Shabanova E. V., Vasil'eva I. E., Bus'ko A. E., Kunaev A. B. Otsenka razmera chastitsy zolota i serebra v geologicheskikh obraztsakh s ispol'zovaniem stintillyatsionnogo atomno-émissiionnogo analiza s vysokim vremennym razresheniem [Estimation of Au- and Ag-particle sizes using high time-resolved scintillation atomic emission analysis] / Analit. Kontrol'. 2010. Vol. 14. N 4. P. 186 – 200 [in Russian].
8. Raikhsbaum Ya. D. Fizicheskie osnovy spektral'nogo analiza [Physical basis of spectral analysis]. — Moscow: Nauka, 1980. — 159 p. [in Russian].
9. Garanin V. G., Neklyudov O. A., Petrochenko D. V., et al. Programmnoe obespechenie atomno-émissiionnogo spektral'nogo analiza (programma «Atom») [Software for atomic-emission spectral analysis (program «Atom»)] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 69 – 74 [in Russian].
10. Shatalov I. G., Kosykh V. P., Labusov V. A., Neklyudov O. A. Algoritm obrabotki posledovatel'nosti atomno-émissiionnykh spektrov vo vremeni dlya snizheniya predelov obnaruzheniya élementov [Algorithm for processing sequences of atomic emission spectra in time for reduce the detection limits of elements] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2011. Vol. 77. N 7. P. 38 – 43 [in Russian].
11. Semenov Z. V., Labusov V. A., Neklyudov O. A., Vashchenko P. V. Algoritm obrabotki posledovatel'nosti spektrov dlya atomno-émissiionnogo spektral'nogo analiza [Algorithm for processing sequences of spectra for scintillation atomic emission spectral analysis] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 135 – 142 [in Russian].
12. Rusanov A. K., Serdobova L. I. O Vliyanií sostava i dispersnosti prob na rezul'taty spektral'nogo analiza s vduvaniem poroshkov v plazmu dugi [Influence of the composition and dispersion of samples for results of spectral analysis with injection powders in a plasma arc] / Zh. Prikl. Spektrosk. 1971. Vol. 14. Issue 6. P. 963 – 968 [in Russian].
13. Cherevko A. S., Yudelevich I. G., Popova V. P., Tagil'tsev A. P. Atomno-émissiionnyi spektral'nyi analiz poroshkov s ispol'zovaniem dugovogo dvukhstruynogo plazmatrona [Atomic emission spectral analysis of powders using double-jet arc plasmatron] / Zh. Analit. Khimii. 1988. N 3. P. 426 – 433 [in Russian].