

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-139-144

ДВУХСТРУЙНАЯ ДУГОВАЯ ПЛАЗМА: МАТРИЧНЫЕ ВЛИЯНИЯ И СПОСОБЫ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

© Наталья Павловна Заксас¹, Александр Федорович Веряскин²¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: zak@niic.nsc.ru² Институт автоматизации и электротометрии СО РАН, ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия.

*Статья поступила 3 октября 2018 г. Поступила после доработки 3 октября 2018 г.
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Двухструйная дуговая плазма применяется для прямого атомно-эмиссионного анализа порошковых проб. Для нее характерны относительно слабые матричные влияния, что позволяет использовать единые образцы сравнения на основе графитового порошка для анализа проб с неорганической, органической и органоминеральной матрицей. В настоящей работе обсуждены матричные влияния, обусловленные разной термостойкостью и эффективностью испарения проб в плазме, что ограничивает применение единого подхода к анализу проб разной природы. При анализе стандартных образцов геологических проб выделена группа элементов (Al, Ba, Ca, La, Mg, Mn, Sr, Ti, Y), для которых имеет место значительное занижение концентраций. Показано, что для определения редкоземельных элементов следует регистрировать спектры в зоне после слияния струй, обеспечивающей полное испарение этих элементов. При использовании этой зоны наблюдения результаты определения других элементов несколько улучшаются, но не достигают аттестованных значений. Для ускорения испарения образца в плазме проведены эксперименты по выбору условий протекания плазмохимических реакций, позволяющих перевести матричные элементы в более летучие формы. Показано, что добавка гидрофторида аммония к порошковой пробе значительно увеличивает интенсивности линий Al и Ca, прочно связанных с кремниевой матрицей. Неполное испарение наблюдалось и при анализе биологических проб с размером частиц более 100 мкм. Для эффективного разложения органической матрицы в плазме было достаточно уменьшить расход транспортирующего аргона, при этом расход газа зависит от термостойкости и размера частиц пробы. Другим способом улучшения испарения биологических проб является предварительное обугливание.

Ключевые слова: двухструйная дуговая плазма; атомно-эмиссионная спектрометрия; матричные влияния; порошковые пробы; размер частиц; эффективность испарения; геологические пробы; органы животных.

A TWO-JET ARC PLASMA: MATRIX EFFECTS AND WAYS TO THEIR SUPPRESSION

© Nataliya P. Zaksas¹, Aleksandr F. Veryaskin²¹ Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; e-mail: zak@niic.nsc.ru² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; "VMK-Optoelektronika", Novosibirsk, Russia.

Received October 3, 2018. Revised October 3, 2018. Accepted November 25, 2018.

A two-jet plasma is used for direct atomic emission analysis of powdered samples. It is characterized by relatively weak matrix effects, which allows using unified calibration samples on the basis of graphite powder for analysis of the samples with inorganic, organic, and organomineral matrix. In the present paper the effects limiting the usage of the unified approach due to different thermal stability and evaporation efficiency of the samples are discussed. The understated concentrations of a set of elements (Al, Ba, Ca, La, Mg, Mn, Sr, Ti, and Y) were obtained in analysis of certified reference materials of geological samples. It was shown that determination of rare earth elements should be carried out in the region behind the jet confluence providing their complete evaporation. For other elements, registration of the spectra in this region improves the results to some extent but they do not achieve the certified values. To speed up evaporation of these elements, the experimental conditions were chosen for plasma chemical reactions which provide conversion of the matrix elements into more volatile compounds. Addition of ammonium hydrofluoride to powdered sample considerably increased the line intensities of Al and Ca strongly associated with the silicon matrix. Incomplete evaporation was observed in analysis of biological samples with particle size more than 100 μm. A decrease in consumption of carrier argon is quite enough for effective decomposition of the organic matrix in plasma; the value of gas consumption depends on thermal stability

and particle size of the sample. Preliminary sample carbonization is another way to improve evaporation of biological samples.

Keywords: two-jet arc plasma; atomic emission spectrometry; matrix effects; powdered samples; particle size; evaporation efficiency; geological samples; animal organs.

Двухструйная дуговая плазма (ДДП) является мощным источником возбуждения для атомно-эмиссионного спектрального (АЭС) анализа твердых проб разной природы. В настоящее время метод ДДП-АЭС, разработанный в середине 70-х годов прошлого столетия, переживает новый этап своего развития благодаря разработкам компании «ВМК-Оптоэлектроника» [1]. Системы питания нового плазмотрона, регулировки газовых потоков и пробоподачи полностью управляются с помощью компьютера.

Как и любой аналитический метод, ДДП-АЭС имеет свои достоинства и ограничения.

Важным достоинством метода являются относительно слабые матричные влияния по сравнению с другими методами, предназначенными для анализа твердых проб (рентгенофлуоресцентный, АЭС с дугой постоянного тока, лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия и др.). Это снижает требования к образцам сравнения (ОС) при анализе проб разной природы. Нами была показана возможность использования образцов сравнения на основе графитового порошка (ГП) с добавкой 15 % NaCl для анализа высококачественных веществ [2 – 4], биологических [5 – 7] и экологических проб [8]. Разбавление пробы спектроскопическим буфером (ГП + 15 % NaCl) в 2 – 10 раз позволяет нивелировать разницу в поведении элементов при введении в плазму ОС на основе ГП и проб с органической, неорганической и органоминеральной матрицей, что проблематично при использовании вышеупомянутых методов.

Одной из причин слабых матричных влияний является слабая зависимость температуры плазмы от состава пробы. Известно, что наиболее сильное влияние на температуру плазмы в других источниках возбуждения оказывают легкоионизируемые элементы. Черевко с соавторами измеряли температуру в аналитической зоне ДДП

после слияния струй (ЗПС) при введении в плазму ГП и ГП с добавкой 25 % NaF [9]. Схема электродного блока и аналитические зоны ДДП представлены на рис. 1. Было показано, что в присутствии натрия максимальное снижение температуры плазмы (~700 К) имеет место в зоне слияния струй, а дальше по потоку разница в температуре уменьшается и составляет не более 300 К в зоне регистрации спектров. При температуре плазмы в несколько тысяч градусов это очень незначительное изменение.

Двадцать лет спустя мы измерили температуру плазмы в аналитической зоне до слияния струй (ЗДС) при введении в плазму ГП и ГП с разными добавками NaCl (от 10 до 50 %) [10]. Найдено, что в присутствии натрия температура практически не меняется в оптимальной зоне наблюдения и лишь в прилегающей к слиянию зоне уменьшается на 700 К. Таким образом, в разное время разными авторами были получены сопоставимые результаты при использовании разных методик измерения. Для измерения температуры в ЗПС использовали пирометрические пары линий Zn, а в ЗДС температуру измеряли по наклону прямой Больцмановского распределения атомов Fe по возбужденным уровням.

Тем не менее хотя матричные влияния в ДДП слабее, чем в других источниках возбуждения для анализа твердых проб, они все же имеют место. В настоящей работе обсуждаются влияния, ограничивающие возможность применения предложенного нами унифицированного подхода к анализу проб разной природы.

Спектральные матричные влияния. Спектральные матричные влияния наблюдаются во всех источниках возбуждения спектров, и зачастую даже высокая разрешающая способность спектрометра не позволяет выделить сигнал аналита из-за спектральных наложений матричных элементов. Так, нами было показано, что метод ДДП-АЭС не может быть использован для прямого многоэлементного анализа высококачественного оксида вольфрама. Даже при 10-кратном разбавлении пробы буфером линии вольфрама перекрывают большинство аналитических линий элементов, в то время как в графитовой дуге спектр этого же образца существенно беднее из-за образования труднолетучего карбида вольфрама в кратере электрода [11]. Графитовая дуга постоянного тока оказалась более подходящим источ-

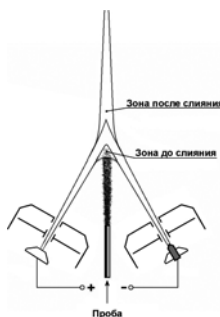


Рис. 1. Электродный блок плазмотрона и аналитические зоны

ником возбуждения для анализа оксида вольфрама. Предложенная нами методика позволяет определять более 30 примесей в оксиде вольфрама с пределами обнаружения (ПО) от 0,01 до 5 мкг/г. ДДП использовали только для определения Mo и Re, образующих, как и W, труднотопочные соединения в кратере электрода.

На примере оксида вольфрама видно, что эффективное испарение матрицы, имеющей многолинейчатый спектр, может существенно осложнить проведение многоэлементного анализа. Для многоэлементного ДДП-АЭС анализа оксида вольфрама разработана методика с отделением основы пробы в виде вольфрамат-иона методом ионной хроматографии [12]. Разработанная методика позволяет анализировать не только оксид вольфрама, но и сцинтилляционные кристаллы вольфрамата кадмия, для которого не описаны методики многоэлементного анализа. Пределы обнаружения 18 элементов лежат в диапазоне 0,5 – 500 нг/г.

Влияние эффективности испарения матрицы. Ранее было показано, что в ДДП имеет место нарушение локального термодинамического равновесия из-за участия метастабильного аргона в процессе ионизации атомов, что ведет к значимой разнице температур возбуждения атомов и ионов ($T_{ат}$ и $T_{ион}$ соответственно) [13]. $T_{ат}$ и $T_{ион}$ железа были измерены вдоль всего плазменного потока [14]. В оптимальной зоне регистрации спектров в ЗДС $T_{ат} = 6000$ К и $T_{ион} = 7900$ К, в ЗПС $T_{ат} = 7000$ К и $T_{ион} = 8000$ К. Температура достигает максимальных значений в области слияния струй: $T_{ат} = 8000$ К и $T_{ион} = 9900$ К. Несмотря на высокую температуру, далеко не все материалы полностью испаряются в плазме, что обусловлено коротким временем пребывания пробы в «горячей» зоне. Если не учитывать тормозные эффекты при столкновении транспортирующего потока с плазменными струями, то при расходе транспортирующего аргона 1 л/мин скорость потока составляет около 10 м/с, т.е. зону наблюдения высотой 1 мм транспортирующий газ проходит за доли миллисекунды, что, конечно, недостаточно для эффективного испарения термостойких материалов. При регистрации спектров в ЗПС проба проходит ЗДС, область слияния струй и часть пути в ЗПС, что обеспечивает более эффективное испарение пробы, но при этом ухудшаются ПО элементов [15]. Для определения низких концентраций элементов предпочтительнее использование ЗДС.

Проблема эффективности испарения особенно актуальна при анализе геологических проб, имеющих сложный минеральный состав. В табл. 1 приведены размеры частиц разных минералов, при которых происходит их полное испа-

рение в ДДП [16]. Видно, что эффективность испарения зависит от химического состава, структуры и размера частиц.

Даже для относительно «мягких» минералов размер частиц не должен превышать 20 – 30 мкм. Для минералов с твердостью 7 и более единиц полное испарение происходит при размере частиц 5 – 10 мкм и менее. В лабораторной аналитической практике для растирания проб обычно используют яшмовые и агатовые ступки, их твердость по шкале Мооса составляет 6,5 – 7,0. Получение мелкодисперсных порошковых проб из минералов с сопоставимой или большей твердостью путем растирания в таких ступках проблематично.

Для получения правильных результатов определения элементов необходимо, чтобы эффективность их испарения из частиц анализируемого материала и образцов сравнения была одинакова. Из-за различия в структуре и минеральном составе термостойкость геологических проб может существенно различаться, поэтому приготовление ОС, близких по химическому составу и термостойкости к анализируемым пробам, является трудновыполнимой задачей. По этой причине анализ геологических проб с использованием ОС на основе ГП в ЗДС, где влияние размера частиц на эффективность испарения значительно сильнее, чем в ЗПС, казался невозможным. Однако анализ стандартных образцов почв [8], донных отложений и других геологических проб показал возможность получения правильных результатов для широкого круга элементов (As, B, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, Sn, V, Zn) даже при неполном испарении матрицы, что свидетельствует об их фракционном испарении с частиц пробы. При этом, как правило, занижены концентрации элементов, прочно связанных с матрицей (Al, Ba, Ca, La, Mg, Mn,

Таблица 1. Размеры частиц минералов, при которых происходит их полное испарение в зоне после слияния струй [16]

Минерал	Общая формула	Твердость по шкале Мооса	Элемент	Размер частиц, мкм
Крокоит	PbCrO ₄	2,5 – 3,0	Cr	20 – 30
Галенит	PbS	2,0 – 3,0	Pb	20 – 30
Целестин	SrSO ₄	3,0 – 3,5	Sr	10 – 20
Барит	BaSO ₄	3,0 – 3,5	Ba	20 – 30
Сфалерит	ZnS	3,5 – 4,0	Zn	20 – 30
Вольфрамит	(Mn, Fe)WO ₄	4,5 – 5,5	W	<5
Датолит	CaB[SiO ₂](OH)	5,0 – 5,5	B	10 – 20
Берилл	Be ₃ Al ₃ [Si ₆ O ₈]	7,5 – 8,0	Be	<5
Корунд	Al ₂ O ₃	9,0	Al	5 – 10

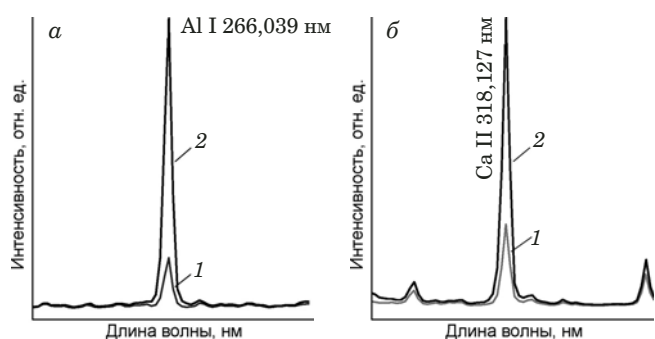


Рис. 2. Аналитические линии Al (а) и Ca (б), полученные для 1 % ГСО 8670 в графитовом порошке в зоне до слияния струй: 1 — без добавки NH_4HF_2 ; 2 — с добавкой 5 % NH_4HF_2

Sr, Ti, Y). Использование ЗПС для регистрации спектров несколько улучшает эффективность испарения этих элементов, но далеко не всегда позволяет достичь их полного испарения. Результаты определения ряда элементов в стандартном образце байкальского ила (БИЛ-1) с использованием ЗДС и ЗПС представлены в табл. 2. Согласно паспортным данным размер 92 % частиц не превышает 25 мкм. Как видно из таблицы, использование ЗПС позволило получить близкие к аттестованным значения концентраций Ca, La и Y. Концентрации Al, Mg и Mn не изменились, а Ba и Sr увеличились, но не достигли аттестованных значений.

Для всех исследованных геологических проб были получены заниженные концентрации La и Y в ЗДС и правильные — в ЗПС. Правильные концентрации Ca в ЗПС были получены для БИЛ-1, но заниженные — для стандартного об-

Таблица 2. Результаты анализа стандартного образца байкальского ила (БИЛ-1), полученные в зонах до и после слияния струй

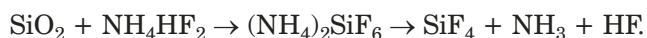
Аналитическая линия, нм	Найдено*		Аттестовано
	Зона до слияния	Зона после слияния	
C, % масс.			
Al I 266,04	2,2	2,2	$7,19 \pm 0,07$
Ca II 318,13	0,53	$1,3 \pm 0,1$	$1,31 \pm 0,06$
Mg I 277,99	0,4	0,4	$1,2 \pm 0,04$
Mn II 260,57	0,18	0,20	$0,31 \pm 0,02$
C, г/т			
Ba II 233,53	170	460	710 ± 70
La II 333,75	6,8	56 ± 6	45 ± 6
Sr II 407,77	85	130	266 ± 30
Y II 332,79	8,3	32 ± 3	30 ± 4

* Относительное стандартное отклонение результатов анализа — 5 – 15 %.

разца БИЛ-2. Таким образом, анализ разных геологических проб показал, что и ЗПС не может обеспечить полного испарения термостойких материалов. Увеличение времени пребывания пробы в плазме может решить проблему определения труднолетучих элементов, но для этого нужны новые технические решения.

Одним из способов, обеспечивающих более эффективное испарение геологических проб в плазме, может быть проведение плазмохимических реакций, в результате которых образуются легколетучие соединения матричных элементов. Оксид кремния является основным компонентом большинства геологических проб. При анализе эссекитового габбро (ГСО 8670), содержащего около 50 % SiO_2 , концентрации Al и Ca были занижены в несколько раз даже при регистрации спектров в ЗПС. Предварительные исследования показали, что использование гидрофторида аммония (NH_4HF_2) в качестве добавки к разбавленной пробе существенно увеличивает интенсивности аналитических линий элементов, связанных с кремниевой матрицей. Такой способ пробоподготовки для кремнийсодержащих матриц представляется перспективным и требует более детального изучения.

Разложение кремниевой матрицы происходит по следующей схеме:



На рис. 2 представлены линии Al и Ca, полученные в ЗДС при введении в плазму 1 % ГСО 8670 в ГП без добавки и с добавкой 5 % NH_4HF_2 .

С проблемой полноты испарения мы столкнулись и при анализе органов животных, имеющих разную структуру и термическую устойчивость. Унифицированную методику с едиными ОС на основе ГП успешно использовали для прямого анализа печени, почек и других органов, высушенные образцы которых легко растереть в ступке из оргстекла в порошок с размером частиц не более 30 мкм. Однако при прямом анализе стандартных образцов мышечных тканей говядины (NIST 8414) и свинины (NCS ZC 81001), а также мозга крыс были получены заниженные результаты [6]. Эластичность мышечных тканей, наличие жира, электростатические взаимодействия не позволяют получить мелкодисперсную пробу; размеры частиц в таких образцах превышают 100 мкм. Проблема их испарения в плазме была решена путем уменьшения расхода транспортирующего аргона. Транспортирующий газ вытесняет воздух из аналитической ЗДС, и при уменьшении его расхода увеличивается концентрация кислорода воздуха в этой зоне, что приводит к более эффективному разложению органической

матрицы с выделением диоксида углерода и воды. Расход транспортирующего газа зависит от природы образца и составляет 0,35 л/мин для мышечных тканей говядины и свинины [6] и 0,6 л/мин для стандартного образца мышц байкальского окуня (БОк-2). Результаты анализа БОк-2, полученные при разном расходе транспортирующего газа, представлены в табл. 3.

Как видно из таблицы, уменьшение расхода транспортирующего аргона на 30 % обеспечило полное разложение мышечных тканей окуня, в то время как для более термостойких мышц говядины и свинины потребовалось уменьшить расход газа более чем в два раза.

Другим способом, обеспечивающим эффективное испарение биологических проб, является процедура предварительного обугливания (не озоления), что делает ткани более хрупкими и позволяет получить мелкодисперсную пробу при растирании в ступке. Кроме того, обугливание обеспечивает более низкие пределы обнаружения микроэлементов, чем прямой анализ [17].

Таким образом, отделение матрицы, изменение зоны наблюдения и расхода газа, а также проведение плазмохимических реакций могут существенно ослабить матричные влияния, связанные с эффективностью испарения проб в плазме.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лабусов 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.
2. **Shelpakova I. R., Zaksas N. P., Komissarova L. N., Kovalevskij S. V.** Spectral methods for analysis of high-purity gallium with excitation of spectra in the two-jet arc plasmatron / J. Anal. At. Spectrom. 2002. Vol. 17. P. 270 – 273.
3. **Заксас Н. П., Комиссарова Л. Н., Шелпакова И. Р.** Атомно-эмиссионный спектральный анализ высококачественного диоксида теллура с возбуждением спектров в двухструйном дуговом плазматроне / Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 3. С. 240 – 244.
4. **Заксас Н. П., Комиссарова Л. Н., Шелпакова И. Р.** Анализ индия и его оксида с использованием двухструйного дугового плазматрона / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Специальный выпуск. С. 89 – 92.
5. **Zaksas N. P., Gerasimov V. A., Nevinsky G. A.** Simultaneous determination of Fe, P, Ca, Mg, Zn and Cu in whole blood by two-jet plasma atomic emission spectrometry / Talanta. 2010. Vol. 80. P. 2187 – 2190.
6. **Zaksas N. P., Nevinsky G. A.** Solid sampling in analysis of animal organs by two-jet plasma atomic emission spectrometry / Spectrochim. Acta. Part B. 2011. Vol. 66. P. 861 – 865.
7. **Zaksas N. P., Sultangazieva T. T., Gerasimov V. A.** Determination of trace elements in bone by two-jet plasma atomic emission spectrometry / Anal. Bioanal. Chem. 2008. Vol. 391. P. 687 – 693.
8. **Zaksas N. P., Veryaskin A. F.** Solid sampling in analysis of soils by two-jet plasma atomic emission spectrometry / Anal. Sci. 2017. Vol. 33. P. 605 – 609.

Таблица 3. Результаты прямого анализа (мкг/г) стандартного образца мышц байкальского окуня (БОк-2)

Аналитическая линия, нм	Расход транспортирующего аргона, л/мин		Аттестовано
	0,85	0,60	
Ca II 317,933	730 ± 120	1400 ± 220	1700 ± 300
Cu I 327,395	1,2 ± 0,1	2,0 ± 0,2	1,9 ± 0,3
Fe I 302,063	47 ± 4	49 ± 6	54 ± 11
Mg I 277,98	590 ± 80	1050 ± 110	1030 ± 120
Mn I 279,826	1,2 ± 0,1	1,5 ± 0,3	1,7 ± 0,3
P I 214,914	7200 ± 300	9800 ± 700	9500 ± 500
Zn II 206,200	7,3 ± 1,5	18 ± 4	23 ± 2

9. **Черевко А. С., Пикалов В. В., Тагильцев А. П. и др.** Зависимость температуры плазменной струи двухструйного плазматрона от потенциала ионизации запыляющего плазму вещества / Изв. СО АН СССР. Серия хим. наук. 1983. Вып. 6. № 14. С. 80 – 84.
10. **Заксас Н. П., Шелпакова И. Р., Герасимов В. А.** Атомно-эмиссионное определение микроэлементов в порошковых пробах разной природы с возбуждением спектров в двухструйном дуговом плазматроне / Журн. аналит. химии. 2004. Т. 59. № 3. С. 254 – 260.
11. **Комиссарова Л. Н., Моисеенко Е. П., Заксас Н. П., Сапрыкин А. И.** Прямой атомно-эмиссионный спектральный анализ оксида вольфрама с использованием дуги постоянного тока и двухструйной дуговой плазмы / Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 2. С. 73 – 81.
12. **Заксас Н. П., Комиссарова Л. Н., Галкин П. С., Зубарева А. П.** Атомно-эмиссионный анализ высококачественного оксида вольфрама и кристаллов вольфрамата кадмия с ионообменным отделением вольфрама / Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 1. С. 41 – 46.
13. **Zaksas N. P., Gerasimov V. A.** Consideration on excitation mechanisms in a high-power two-jet plasma / Spectrochim. Acta. Part B. 2013. Vol. 88. P. 174 – 179.
14. **Zaksas N. P.** Comparison of excitation mechanisms in the analytical regions of a high-power two-jet plasma / Spectrochim. Acta. Part B. 2015. Vol. 109. P. 39 – 43.
15. **Заксас Н. П., Веряскин А. Ф., Лабусов В. А.** Аналитические зоны двухструйной дуговой плазмы: достоинства и ограничения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 48 – 52.
16. **Черевко А. С.** Механизм испарения частиц порошкового анализируемого материала в разряде дугового аргонового двухструйного плазматрона / Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66. № 7. С. 722 – 731.
17. **Заксас Н. П., Султангазиева Т. Т., Корда Т. М.** Использование двухструйного дугового плазматрона для определения микроэлементного состава порошковых биологических проб / Журн. аналит. химии. 2006. Т. 61. № 6. С. 632 – 637.

REFERENCES

1. **Labusov V. A.** Devices and Systems for Atomic Emission Spectroscopy Produced by “VMK-Optoelektronika” State-of-the-Art / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 12 – 21 [in Russian].
2. **Shelpakova I. R., Zaksas N. P., Komissarova L. N., Kovalevskij S. V.** Spectral methods for analysis of high-purity gallium with excitation of spectra in the two-jet arc plasmatron / J. Anal. At. Spectrom. 2002. Vol. 17. P. 270 – 273.
3. **Zaksas N. P., Komissarova L. N., Shelpakova I. R.** Atomic emission spectral analysis of high purity tellurium dioxide with spectral excitation in a two-jet arc plasmatron / Analit. Kontrol'. 2005. Vol. 9. N 3. P. 240 – 244 [in Russian].
4. **Zaksas N. P., Komissarova L. N., Shelpakova I. R.** Analysis of indium and indium oxide using two-jet arc plasmatron /

- Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 89 – 92 [in Russian].
5. **Zaksas N. P., Gerasimov V. A., Nevinsky G. A.** Simultaneous determination of Fe, P, Ca, Mg, Zn and Cu in whole blood by two-jet plasma atomic emission spectrometry / *Talanta*. 2010. Vol. 80. P. 2187 – 2190.
 6. **Zaksas N. P., Nevinsky G. A.** Solid sampling in analysis of animal organs by two-jet plasma atomic emission spectrometry / *Spectrochim. Acta. Part B*. 2011. Vol. 66. P. 861 – 865.
 7. **Zaksas N. P., Sultangazieva T. T., Gerasimov V. A.** Determination of trace elements in bone by two-jet plasma atomic emission spectrometry / *Anal. Bioanal. Chem.* 2008. Vol. 391. P. 687 – 693.
 8. **Zaksas N. P., Veryaskin A. F.** Solid sampling in analysis of soils by two-jet plasma atomic emission spectrometry / *Anal. Sci.* 2017. Vol. 33. P. 605 – 609.
 9. **Cherevko A. S., Pikalov V. V., Tagiltsev A. P., et al.** Dependence of the plasma jet temperature of a two-jet plasmatron on the ionization potential of a dusting substance / *Izv. AN SSSR. Ser. Khim. Nauk.* 1983. Issue 6. N 14. P. 80 – 84 [in Russian].
 10. **Zaksas N. P., Shelpakova I. R., Gerasimov V. A.** Determination of trace elements in different powdered samples by atomic emission spectrometry with spectral excitation in a two-jet arc plasmatron / *J. Anal. Chem.* 2004. Vol. 59. P. 222 – 228.
 11. **Komissarova L. N., Moiseenko E. P., Zaksas N. P., Saprykin A. I.** Direct atomic emission spectral analysis of tungsten oxide using a direct current arc and two-jet arc plasma / *Analit. Kontrol'.* 2010. Vol. 14. N 2. P. 73 – 81 [in Russian].
 12. **Zaksas N. P., Komissarova L. N., Galkin P. S., Zubareva A. P.** Analysis of high-purity tungsten oxide and cadmium tungstate crystals by atomic emission spectrometry using ion exchange tungsten separation / *Analit. Kontrol'.* 2013. Vol. 17. N 1. P. 41 – 46 [in Russian].
 13. **Zaksas N. P., Gerasimov V. A.** Consideration on excitation mechanisms in a high-power two-jet plasma / *Spectrochim. Acta. Part B*. 2013. Vol. 88. P. 174 – 179.
 14. **Zaksas N. P.** Comparison of excitation mechanisms in the analytical regions of a high-power two-jet plasma / *Spectrochim. Acta. Part B*. 2015. Vol. 109. P. 39 – 43.
 15. **Zaksas N. P., Veryaskin A. F., Labusov V. A.** Analytical Zones of High-Power Two-Jet Plasma: Advantages and Limitations / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 48 – 52 [in Russian].
 16. **Cherevko A. S.** Mechanism of the evaporation of particles of powder test materials in the discharge of a two-jet argon arc plasmatron / *J. Anal. Chem.* 2011. Vol. 66. P. 610 – 619.
 17. **Zaksas N. P., Sultangazieva T. T., Korda T. M.** Using a two-jet arc plasmatron for determining the trace element composition of powdered biological samples / *J. Anal. Chem.* 2006. Vol. 61. P. 582 – 587.