

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-77-82>

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УСТАНОВКИ С ДУГОВЫМ ДВУХСТРУЙНЫМ АРГОНОВЫМ ПЛАЗМОТРОНОМ И КОМПЛЕКСА «ГРАНД-ПОТОК» ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

© Алексей Сергеевич Шавекин*, Светлана Борисовна Заякина, Сергей Михайлович Жмодик

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3;

*e-mail: shavekin@igm.nsc.ru

*Статья поступила 9 октября 2021 г. Поступила после доработки 7 ноября 2021 г.
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с дуговым возбуждением спектра позволяет определять редкоземельные элементы (РЗЭ) в геологических образцах путем прямого анализа твердых проб без длительной пробоподготовки. На примере анализа образца редкоземельной руды Томторского ниобий-редкоземельного месторождения сравнили аналитические возможности установки «Гранд-Поток» и двухструйного дугового плазматрона (ДДП) в сочетании со спектрографом ДФС-458С, оснащенный многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС). Показано, что более высокая температура плазмы ДДП (~7500 К) по сравнению с плазмой дугового разряда (~5500 К) и смещение диапазона регистрации спектра ДФС-458С в более длинноволновую область (280 – 245 нм) обеспечили возможность определения РЗЭ по большему числу аналитических линий с более низкими пределами обнаружения. Правильность результатов определения РЗЭ, полученных с использованием ДДП, подтверждена сравнением с данными анализа методом ИСП-МС.

Ключевые слова: редкоземельные элементы; атомно-эмиссионный спектральный анализ; двухструйный дуговой плазматрон; многоканальные спектрометры; анализатор МАЭС.

COMPARISON OF THE ANALYTICAL CAPABILITIES OF A FACILITY WITH THE ARC DOUBLE-JET ARGON PLASMATRON AND A GRAND-POTOK COMPLEX IN DETERMINATION OF THE CONTENT OF RARE-EARTH ELEMENTS IN GEOLOGICAL SAMPLES BY ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

© Aleksei S. Shavekin*, Svetlana B. Zayakina, Sergey M. Zhmodik

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, prosp. Akademika Koptuyuga, Novosibirsk, 630090, Russia;

*e-mail: shavekin@igm.nsc.ru

Received October 9, 2021. Revised November 7, 2021. Accepted November 24, 2021.

The method of atomic emission spectrometry with arc spectrum excitation provides determination of rare earth elements (REE) in geological samples by direct analysis of solid samples without a long-term preliminary sample preparation. Using the analysis of a rare-earth ore sample from the Tomtor niobium-rare-earth deposit as an example, we compared the analytical capabilities of a Grand Potok installation and a two-jet arc plasmatron (TJP) in combination with a DFS-458S spectrograph equipped with a multi-channel emission spectrum analyzer (MAES). It is shown that a higher temperature of the TJP plasma (~7500 K) compared to that of the arc discharge (~5500 K) and the shift in the recording range of a DFS-458S spectrum to longer wavelengths (280 – 245 nm) provided a more reliable determination of REE using a larger number of analytical lines with lower detection limits. The correctness of the results of REE determination was confirmed by comparison with the data obtained by the ICP-MS method.

Keywords: rare earth elements; atomic emission spectral analysis; two-jet arc plasmatron, multichannel spectrometers; MAES analyzer.

Введение

Атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) традиционно является одним из самых распространенных и надежных методов многоэлементного анализа образцов различной природы [1]. Несмотря на широкое распространение АЭС с индуктивно-связанной плазмой, представляют интерес варианты метода с другими источниками возбуждения спектров (ИВС), позволяющие проводить прямой анализ твердых проб без предварительной химической пробоподготовки [2], что сокращает время анализа и уменьшает внесимую систематическую погрешность.

Инструментальное определение редкоземельных элементов (РЗЭ) в геологических образцах является актуальной задачей [3 – 5]. Сложность и длительность химической пробоподготовки геологических образцов при определении РЗЭ, обусловленные прежде всего упорностью минералов-носителей РЗЭ [6], заставляют исследователей искать новые подходы, позволяющие повысить точность и экспрессность элементного анализа образцов руд и минералов [7 – 9].

Атомно-эмиссионная спектрометрия с аргоновым дуговым двухструйным плазмотроном (АЭС-ДДП) позволяет проводить анализ твердых проб в виде мелкодисперсных порошков [10]. Возможности АЭС-ДДП для определения элементного состава различных геологических образцов показаны во многих работах [11 – 13], однако практически не исследованы возможности метода для определения РЗЭ. Пределы обнаружения РЗЭ зависят от выбранной аналитической линии элемента и химического состава образца [10].

Цель работы заключалась в сравнении аналитических возможностей двух вариантов метода АЭС — с возбуждением спектра в дуге постоянного тока (установка «Гранд-Поток») и в плазме дугового двухструйного плазмотрона — применительно к определению РЗЭ в геологических образцах.

Экспериментальная часть

Оборудование. Исследования выполнены с использованием атомно-эмиссионного комплекса «Гранд-Поток» («ВМК-Оптоэлектроника», Новосибирск) [14], предназначенного для экспресс-определения состава порошковых проб природного и промышленного происхождения. Комплекс включает в себя установку «Поток», спектрометр «Гранд», оснащенный многоканальным анализатором МАЭС [15], и вспомогательное оборудование для введения пробы в дуговой разряд. Возбуждение спектра образца в установке «Гранд-Поток» происходит методом просыпки-вдувания. Через вертикальную трубку образец, находя-

щийся в порошкообразном состоянии, поступает в электрическую дугу (сила тока — 20 А), возникающую между графитовыми электродами на воздухе.

Вторая установка состоит из аргонового дугового двухструйного плазмотрона и спектрографа ДФС-458С [16 – 19], на котором установлен многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров (МАЭС), разработанный и изготовленный компанией «ВМК-Оптоэлектроника» (г. Новосибирск). Исследуемая проба представляет собой мелкодисперсный порошок с крупностью частиц не более 0,074 – 0,076 мм, который вводят в плазменный поток между струями плазмы. Масса навески составляла 30 мг, время полной экспозиции — 6,5 с, время базовой экспозиции — 100 мс.

Для управления прибором, обработки спектров и статистической обработки результатов анализа использовали программное обеспечение «Атом» («ВМК-Оптоэлектроника») [20].

Образец руды был параллельно проанализирован методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) после сплавления с пероксидом натрия Na_2O_2 (по методике, описанной в работе [21]) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT (Finnigan MAT, Германия) в соответствии с методикой, описанной в работе [7].

Объект исследования. Анализировали образец руды ТМ-96, отобранный на участке Буранный Томторского ниобий-редкоземельного месторождения [22], минеральный состав руд которого включает более 80 минералов: оксиды (пирохлор, гетит, гематит, рутил, ильменорутит), фосфаты (монацит, минералы группы крандаллита, фтор-апатит, ксенотим), карбонаты (сидерит), сульфиды (пирит, галенит, сфалерит, халькопирит), силикаты (каолинит, гидрослюда) [23, 24]. При этом основу руд составляют гетит, монацит и минералы группы крандаллита, пирохлор, оксиды титана.

Для построения градуировочных графиков использовали отраслевой стандартный образец ОСО 250–91 (НФС-23, руда редкоземельная, ВИМС, Россия). Из-за высоких содержаний РЗЭ в стандартном образце (табл. 1) во избежание эффекта самопоглощения аналитического сигнала СО разбавляли спектрально чистым графитовым порошком (ГП) (осч, ГОСТ 23463–79) в 5 раз, затем при приготовлении серии образцов сравнения полученную смесь последовательно разбавляли ГП в 3, 9 и 27 раз (см. табл. 1). Образец руды Томторского месторождения разбавляли графитовым порошком в 3 раза.

Обсуждение результатов

Для определения РЗЭ были выбраны наиболее интенсивные аналитические линии с учетом возможных наложений линий других элементов. В табл. 2 приведены примеры наложения на аналитические линии Ce линий других элементов [25].

Надежность определения повышается при применении нескольких аналитических линий, поэтому для повышения точности результатов анализа был использован подход, реализованный в работе [12].

При анализе с использованием установки «Гранд-Поток» была выбрана область регистрации спектра 180 – 350 нм, поскольку в длинно-

волновой области имеет место наложение молекулярных полос CN, NO, NH и др. на аналитические линии.

При определении РЗЭ с использованием ДДП в спектрограф ДФС-458С установили дифракционную решетку 1200 мм⁻¹, что позволило регистрировать спектры в диапазоне от 280 до 545 нм, где находятся наиболее интенсивные аналитические линии.

В табл. 3 приведены характеристики градуировочных графиков — углы наклона и минимальные достоверно определяемые содержания элемента для наиболее интенсивных аналитических линий.

Пределы обнаружения РЗЭ с использованием ДДП ниже, чем в случае установки «Гранд-Поток». Более высокая температура аргоновой плазмы в ДДП (~7500 К) по сравнению с плазмой дугового разряда установки «Поток» (~5500 К) [26] увеличивает интенсивность аналитических линий и позволяет использовать ли-

Таблица 1. Содержания РЗЭ (ppm) в исходном стандартном образце 250–91 и образцах сравнения

Table 1. The content of REE (ppm) in the initial certified reference material and calibration samples

Элемент	Стандартный образец	Градуировочные образцы			
		1/5	1/5/3	1/5/9	1/5/27
La	54 700	10 940	3647	1216	405
Ce	108 100	21 620	7207	2402	801
Pr	11 500	2300	767	256	85
Nd	36 700	7340	2447	816	272
Sm	4400	880	293	98	33
Eu	1230	246	82	27	9
Gd	2600	520	173	58	19
Dy	1700	340	113	38	13
Ho	300	60	20	7	2
Er	660	132	44	15	5

Таблица 2. Примеры наложения линий других элементов на аналитические линии Ce

Table 2. Examples of line interferences between analytical lines of Ce and other elements

Аналитическая линия Ce, нм	Относительная интенсивность	Мешающие линии, нм
299,087	II 250	
299,564	II 320	Ti II 299,5643, Fe I 299,5676
305,198	II 200	W I 305,1925
306,301	II 680	Th II 306,3028
327,225	II 990	Th I 327,2259

Таблица 3. Характеристики градуировочных графиков для определения РЗЭ по наиболее интенсивным аналитическим линиям

Table 3. Characteristics of the calibration curves for determination of REE by the most intense analytical lines

Определяемый элемент	«Гранд-Поток»			ДДП		
	Длина волны, нм	Угол наклона градуировочного графика α, град.	C _{min} , ppm	Длина волны, нм	Угол наклона градуировочного графика α, град.	C _{min} , ppm
La	310,459	40,9	26	326,567	45,7	9,3
Ce	321,894	40,4	54	321,894	44,3	13
Pr	317,231	42,2	58	424,101	45,4	4,6
Nd	330,0148	41,3	19	391,1169	45,4	8,2
Sm	336,5863	42,5	3	340,8676	43,9	1,6
Eu	268,566	42,0	5	420,505	45,7	0,1
Gd	302,760	39,8	5,8	343,999	44,8	1,3
Tb	328,504	41,8	0,64	351,386	45,0	0,27
Dy	339,3568	40,5	2,1	357,624	44,5	0,56
Ho	303,869	45,4	1,5	406,509	46,6	0,3
Er	322,3305	41,6	1,6	400,797	46,4	0,57
Yb	289,138	38,9	0,14	369,419	43,6	0,09

нии с более высокими энергиями возбуждения. Кроме того, аргоновая плазма свободна от молекулярных полос CN, NO, NH, что также повышает надежность результатов.

Для определения каждого редкоземельного элемента использовали несколько (от 3 до 12) аналитических линий. В табл. 4 приведены результаты определения Се в образце ТМ-96 с использованием ДДП по 12 аналитическим линиям. Для каждой линии проводили 3 независимых измерения. Из табл. 4, видно, что использование нескольких аналитических линий вместо одной позволяет уменьшить абсолютную погрешность определения.

Таким образом, более высокие температурные характеристики плазмы ДДП, возбуждение спектра в аргоновой среде [27] и его регистрация в более широком диапазоне позволяют выбрать большее количество аналитических линий, что повышает точность и надежность полученных результатов.

Средние содержания РЗЭ, рассчитанные по нескольким аналитическим линиям, которые была получены с использованием ДДП, сопоставили с результатами определения РЗЭ методом

ИСП-МС [27]. Рассчитанные значения критерия Стьюдента для большинства РЗЭ меньше табличного значения, что говорит о незначительном различии результатов, полученных двумя методами (табл. 5).

Заключение

Таким образом, оценены аналитические возможности двух установок — «Гранд-Поток» и дугового двухструйного плазмотрона в сочетании со спектрографом ДФС-458 с МАЭС — для определения РЗЭ в геологических образцах на примере образца редкоземельной руды ТМ-96 из Томторского ниобий-редкоземельного месторождения.

Более высокая температура плазмы ДДП и диапазон регистрации спектра 280 – 545 нм, свободный от наложения молекулярных полос CN, NO, NH, позволяют определять РЗЭ с более низкими пределами обнаружения по большему числу аналитических линий, чем при использовании установки «Гранд-Поток».

При анализе образца арбитражным методом (ИСП-МС) не было выявлено значимых расхож-

Таблица 4. Содержания Се в образце ТМ-96, полученные с использованием ДДП по разным аналитическим линиям ($n = 3$; $P = 0,95$)

Table 4. Се contents in ТМ-96 sample obtained using TJP by different analytical lines ($n = 3$; $P = 0.95$)

Аналитическая линия, нм	Содержание, ppm	Аналитическая линия, нм	Содержание, ppm
Се 320,171	22885 ± 709	Се 404,076	22156 ± 576
Се 321,894	22040 ± 749	Се 408,122	23552 ± 471
Се 356,080	23100 ± 485	Се 414,500	22918 ± 504
Се 365,585	22781 ± 478	Се 424,868	22972 ± 413
Се 394,215	22092 ± 508	Се 456,236	22107 ± 531
Се 394,275	22869 ± 480	Се 462,816	22263 ± 712
Среднее	22690 ± 494		

Таблица 5. Содержания РЗЭ, полученные методами ДДП-АЭС и ИСП-МС

Table 5. Average REE contents obtained by TJP and ICP-MS

Элемент	ИСП-МС	ДДП-АЭС (количество аналитических линий)	Значение критерия Стьюдента	
			$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$
La	10800 ± 1620	10823 ± 500 (10)	0,10	2,26
Ce	22800 ± 3420	22690 ± 500 (12)	0,74	2,23
Pr	2300 ± 345	2233 ± 100 (9)	1,99	2,31
Nd	8000 ± 1200	8320 ± 600 (11)	1,33	2,23
Sm	2700 ± 405	2450 ± 300 (5)	1,96	2,78
Eu	1000 ± 150	1260 ± 300 (4)	1,49	3,18
Gd	3500 ± 525	3833 ± 300 (8)	2,36	2,37
Dy	3000 ± 450	2658 ± 400 (4)	2,61	3,18
Ho	510 ± 77	411 ± 100 (3)	4,07	4,30
Er	980 ± 145	986 ± 330 (3)	0,03	4,30

дений полученных результатов с данными метода ДДП-АЭС.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного проекта Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН при поддержке РНФ № 18-17-00120 с использованием оборудования «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН».

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность к. г.-м. н. Е. В. Лазаревой, к. г.-м. н. И. Н. Мягкой и Б. Ю. Сарыг-оол за консультации и ценные замечания при работе над данной статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аношин Г. Н., Заякина С. Б., Путьмаков А. Н. Атомно-эмиссионный спектральный анализ и науки о Земле / «Химический анализ в геологии и геохимии» // Под ред. Г. Н. Аношина. — Новосибирск: Гео, 2016. С. 235 – 244.
2. Заякина С. Б., Аношин Г. Н. Дуговой двухструйный плазматрон в аналитической спектрометрии. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. — 261 с.
3. Николаева И. В., Палесский С. В., Карпов А. В. Сравнение ИСП-МС анализа геологических образцов в варианте растворов и лазерной абляции стекол / Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 26 – 34. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/263
4. Zawisza B., Pytlakowska K., Feist B., et al. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: a review / J. Anal. At. Spectrom. 2011. Vol. 26. N 12. P. 2373 – 2390. DOI: 10.1039/C1JA10140D
5. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact / Geosci. Front. 2019. Vol. 10. N 4. P. 1285 – 1303. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
6. Горбатенко А. А., Ревина Е. И. Инструментальные методы определения редкоземельных элементов (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 4. С. 7 – 19.
7. Жерноклеева К. В., Барановская В. Б. Анализ чистых скандия, иттрия и их оксидов методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 11. С. 20 – 26.
8. Карандашев В. К., Жерноклеева К. В., Барановская В. Б. и др. Анализ высокочистых материалов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. С. 17 – 30.
9. Карандашев В. К., Жерноклеева К. В., Барановская В. Б. и др. Определение примесей тугоплавких металлов в редкоземельных металлах и их соединениях / Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67. № 4. С. 383 – 392.
10. Дзюба А. А., Лабузов 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
11. Путьмаков А. Н., Попов В. И., Лабузов В. А. и др. Новые возможности модернизированных спектральных приборов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Спецвыпуск. С. 26 – 28.
12. Заксас Н. П., Верякин А. Ф., Лабузов В. А. Возможности двухструйной дуговой плазмы для прямого анализа проб разной природы / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 86 – 88.
13. Yudelevich I. G., Cherevko A. S., Engelsht V. S., et al. A two-jet plasmatron for the spectrochemical analysis of geological samples / Spectrochim. Acta, Part B. 1984. Vol. 39. N 6. P. 777 – 785. DOI: 10.1016/0584-8547(84)80086-5
14. Заксас Н. П., Шелпакова И. Р., Герасимов В. Г. 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.
15. Черевко А. С., Сысо А. И. Использование многоэлементного атомно-эмиссионного спектрографического анализа природных объектов в эколого-агрохимических исследованиях / Агрохимия. 2010. № 11. С. 70 – 79.
16. Павлычева Н. К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. — Казань: Изд. КГТУ, 2003. С. 197.
17. Павлычева Н. К. Оптические схемы дифракционных спектральных приборов: новые технологии — новые возможности / Материалы V Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности». Новосибирск, 2004. <http://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/2004-V-symposium.pdf> (дата обращения 06.11.2021).
18. Пат. РФ 55525. Герасимов В. А., Лабузов В. А., Саушкин М. С. (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Новосибирск). Двухструйный дуговой плазматрон для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Опубл. 10.08.2006.
19. Пат. РФ 2298889. Герасимов В. А., Лабузов В. А., Саушкин М. С. (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Новосибирск). Двухструйный дуговой плазматрон для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Опубл. 10.05.2007.
20. Гаранин А. А., 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
21. Сарыг-оол Б. Ю., Букреева Л. Н., Мягкая И. Н. и др. Влияние химической пробоподготовки на определение высоких содержаний редкоземельных и высокозарядных элементов в геологических образцах методами ИСП-АЭС и ИСП-МС (на примере пород и руд месторождения «Томтор») / Журн. СФУ. Химия. 2020. Т. 13. № 4. С. 593 – 605. DOI: 10.17516/1998-2836-0208
22. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080 – 1115. DOI: 10.15372/GIG20150603
23. Коноплев А. Д., Толстов А. В., Васильев А. Т. и др. Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении Томтор. Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах. — М.: Наука, 1995. С. 223 – 241.
24. Минерогения кор выветривания карбонатитов. Методическое руководство / Под ред. Н. В. Межеловского. — М.: Геокарт, ГеоС, 2011. — 308 с.
25. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М., Шрейдер Е. Я. Таблица спектральных линий. — М.: Наука, 1977. — 798 с.
26. Шавекин А. С., Купцов А. В., Заякина С. Б., Аношин Г. Н. Сравнение результатов сцинтилляционного анализа полученных с использованием установки «Поток» и дугового двухструйного плазматрона «Факел» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. 2. С. 97 – 100.
27. Шавекин А. С., Заякина С. Б., Сарыг-оол Б. Ю. и др. Определение рудных содержаний редкоземельных элементов в геологических образцах методом атомно-эмиссионной

спектрометрии с дуговым двухструйным плазматроном / Журн. СФУ. Химия. 2021. Т. 14. № 1. С. 59 – 71.
DOI: 10.17516/1998-2836-0216

REFERENCES

1. Anoshin G. N., Zayakina S. B., Put'makov A. N. Atomic-emission spectral analysis and earth science / Chemical analysis in geology and geochemistry / Anoshin G. N., Ed. — Novosibirsk: GEO, 2016. P. 235 – 244 [in Russian].
2. Zayakina S. B., Anoshin G. N. Two-jet arc plasmatron in analytical spectrometry. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. — 261 p. [in Russian].
3. Nikolaeva I. V., Palesskiy S. V., Karpov A. V. Analysis of geological samples: comparison of solution ICP-MS and fused glasses LA-ICP-MS techniques / Bull. Tomsk Polytech. univ. Geo assets engin. 2019. Vol. 330. N 5. P. 26 – 34.
DOI: 10.18799/24131830/2019/5/263
4. Zawisza B., Pytlakowska K., Feist B., et al. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: a review / J. Anal. At. Spectrom. 2011. Vol. 26. N 12. P. 2373 – 2390.
DOI: 10.1039/C1JA10140D
5. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact / Geosci. Front. 2019. Vol. 10. N 4. P. 1285 – 1303.
DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
6. Gorbatenko A. A., Revina E. I. Instrumental methods for determining rare-earth elements (review) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 4. P. 7 – 19 [in Russian].
7. Zherokleyeva K. V., Baranovskaya V. B. Analysis of pure scandium, yttrium and their oxides with atomic-emission spectrometry with inductive-bound plasma and mass spectrometry with inductively coupled plasma / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 11. P. 20 – 26 [in Russian].
8. Karadashev V. K., Zherokleyeva K. V., Baranovskaya V. B., et al. Analysis of high purity materials by mass spectrometry with inductively coupled plasma (review) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. P. 17 – 30 [in Russian].
9. Karadashev V. K., Zherokleyeva K. V., Baranovskaya V. B., et al. Determination of admixtures of high-melting metals in rare earth metals and their compounds / J. Anal. Chem. 2012. Vol. 67. N 4. P. 340 – 348.
DOI: 10.1134/S1061934812040107
10. 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
11. Put'makov A. N., Popov V. I., Labusov V. A., et al. New possibilities of modernized spectral instruments / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 26 – 28 [in Russian].
12. Zaksas N. P., Veryaskin A. F., Labusov V. A. Possibilities of a two-jet arc plasma for the analysis of direct samples of different nature / Zav. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 86 – 88 [in Russian].
13. Yudelevich I. G., Cherevko A. S., Engelsht V. S., et al. A two-jet plasmatron for the spectrochemical analysis of geological samples / Spectrochim. Acta. Part B. 1984. Vol. 39. N 6. P. 777 – 785. DOI: 10.1016/0584-8547(84)80086-5
14. Zaksas N. P., Shelpakova I. R., Gerasimov V. G. 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. N 3. P. 222 – 228.
DOI: 10.1023/B:JANC.0000018963.03529.e0
15. Cherevko A. S., Syso A. I. Multielement atomic emission spectrographic analysis of natural objects in environmental and agrochemical research / Agrokimiya. 2010. Vol. 11. P. 70 – 79 [in Russian].
16. Pavlycheva N. K. Spectral devices with non-classical diffraction gratings. — Kazan: Izd. KG TU, 2003. P. 197 [in Russian].
17. Pavlycheva N. K. Optical schemes of diffraction spectral devices: new technologies, new possibilities / Proc. of the V Int. Symp. "Application of MAES analyzers in industry". Novosibirsk, 2004. <http://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/2004-V-symposium.pdf> (accessed November 6, 2021) [in Russian].
18. RF Pat. No. 55525. Gerasimov V. A., Labusov V. A., Sayushkin M. S. (LLC "IMK-Optoelectronics", Novosibirsk). Two-jet arc plasmatron for atomic emission spectral analysis. Publ. 10.08.2006 [in Russian].
19. RF Pat. No. 2298889. Gerasimov V. A., Labusov V. A., Sayushkin M. S. (LLC VMK-Optoelectronics, Novosibirsk). Two-jet arc plasmatron for atomic emission spectral analysis. Publ. 10.05.2007 [in Russian].
20. Garanin A. A., Neklyudov O. A., Petrochlenko 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
21. Saryg-ool B. Yu., Bukreeva L. N., Myagkaya I. N., et al. Influence of sample digestion on the determination of high contents of rare-earth and high field strength elements in geological samples by ICP-AES and ICP-MS (case study of the Tomtor deposit) / J. Sib. Fed. Univ. Chem. 2020. Vol. 13. N 4. P. 593 – 605. DOI: 10.17516/1998-2836-0208
22. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Tolstov A. V., et al. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) / Rus. Geol. Geophys. 2015. Vol. 56. N 6. P. 844 – 873. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.05.003
23. Konoplev A. D., Tolstov A. V., Vasilyev A. T., et al. Features of the localization of reductional mineralization at the Tomtor deposit. Redqueto-uranium ore formation in sedimentary rocks. — Moscow: Nauka, 1995. P. 223 – 241 [in Russian].
24. Minerage core weathering carbonatites: a handbook / N. V. Mezhelevskiy, Ed. — Moscow: Geokart, Geos, 2011. P. 30 [in Russian].
25. Zaidel' A. N., Prof'ofev V. K., Raisky S. M., Shreider E. Ya. Tables of spectral lines. — Moscow: Nauka, 1977. — 798 p. [in Russian].
26. Shavekin A. S., Kuptsov A. V., Zayakina S. B., et al. Comparison of the results of scintillation atomic emission analysis obtained on spectral system "Potok" and a two-jet arc plasmatron "Fakel" / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 2. Part II. P. 97 – 100 [in Russian].
27. Shavekin A. S., Zayakina S. B., Saryg-ool B. Yu., et al. Determination of ore contents of rare earth elements in geological samples by atomic emission spectrometry with arc two-jet plasmatron / J. Sib. Fed. Univ. Chem. 2020. Vol. 13. N 4. P. 59 – 71 [in Russian]. DOI: 10.17516/1998-2836-0216