

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.51; 543.062; 543.08

**ОЦЕНКА МАТРИЧНОГО ВЛИЯНИЯ И ВЫБОР ОБРАЗЦОВ СРАВНЕНИЯ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ОБРАЗЦАХ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ
С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ****Ирина Викторовна Николаева¹, Станислав Владиславович Палесский²,
Анна Александровна Кравченко³**¹⁻³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск,
Россия**Автор, ответственный за переписку:** Ирина Викторовна Николаева,
inikol@igm.nsc.ru**Финансирование.** Работа выполнена по государственному заданию Института
геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН №0330-2016-0013.**Для цитирования:** Николаева И.В., Палесский С.В., Кравченко А.А. Оценка матричного влияния и выбор образцов сравнения для определения микроэлементов в геологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 2. С. 132–140.**Аннотация.** Дана экспериментальная оценка необходимости учета неспектрального матричного влияния при определении 17 микроэлементов в растворах геологических образцов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) в целях снижения погрешности анализа. Проведено сравнение результатов, полученных с использованием разных образцов сравнения для внешней градуировки – эталонных растворов в азотной кислоте, этих же растворов с добавлением метабората лития для имитации матрицы и раствора стандартного образца (BHVO-1) в сочетании с внутренним стандартом (In). Установлено, что применение в качестве образца сравнения раствора BHVO-1 с матричным составом, аналогичным составу анализируемых образцов, обеспечивает получение МС-ИСП результатов с наименьшими отклонениями от аттестованных значений для всех 17 элементов во всех изученных стандартных геологических образцах.**Ключевые слова:** масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП), неспектральное матричное влияние, внешняя градуировка, стандартные образцы

ORIGINAL ARTICLE

**EVALUATION OF THE MATRIX EFFECT AND SELECTION
OF REFERENCE SAMPLES FOR THE ICP-MS TRACE ELEMENTS
DETERMINATION IN GEOLOGICAL SAMPLES****Irina V. Nikolaeva¹, Stanislav V. Palesskiy², Anna A. Kravchenko³**¹⁻³ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia**Corresponding author:** Irina V. Nikolaeva, inikol@igm.nsc.ru**Abstract.** In this work, the need of the non-spectral matrix effects assessment was experimentally evaluated for determination of 17 trace elements in solutions of

geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in order to reduce the analysis error. Comparison of the ICP-MS results obtained with different reference samples for external calibration is carried out. As reference samples we used the multielement solutions in nitric acid, these solutions with the addition of lithium metaborate for simulate the matrix and solution of reference geological material – BHVO-1 with an internal standard (In). It was found that the use of BHVO-1 solution as matching calibration provides ICP-MS results with the minimal errors for all 17 elements in all geological samples.

Keywords: inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), non-spectral matrix effects, external calibration, reference materials.

Financial Support. The work was carried out according to the state assignment of the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS No. 0330-2016-0013.

For citation: Nikolaeva I.V., Palesskiy S.V., Kravchenko A.A. Evaluation of the Matrix Effect and Selection of Reference Samples for the ICP-MS Trace Elements Determination in Geological Samples // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. T. 63. N 2. P. 132–140.

При проведении количественного анализа с определением большого числа элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) основное внимание необходимо уделять учету и/или снижению спектрального и неспектрального влияния матрицы. Неспектральное влияние матрицы, возникающее на всех стадиях анализа, начиная от распыления образца и заканчивая прохождением системы ионной оптики, приводит к изменению чувствительности определяемых элементов и зависит от свойств (в первую очередь, потенциала ионизации) составляющих матрицу элементов, их концентраций, инструментальных параметров, а также от свойств самих аналитов [1–6]. При анализе геологических образцов наряду с определяемыми микроэлементами в растворах содержится сложная матрица переменного состава, основу которой составляют порообразующие элементы – Si, Ca, Na, K, Ti, Fe, Al, Mg, Mn. Если для разложения образцов применяют сплавление или спекание, то в анализируемом растворе присутствует значительное количество тех элементов, которые привносятся при пробоподготовке (например, бор и литий при сплавлении с метаборатом лития). Зависимость чувствительности от массы определяемых элементов в присутствии матрицы нелинейна, поэтому ее трудно скорректировать при определении большого числа элементов с различающимися массами. Для снижения и/или компенсации неспектрального матричного влияния применяют разные приемы:

отделение определяемых элементов от матрицы химическими способами [2, 7, 8];

увеличение коэффициента разбавления анализируемого раствора до измерения и аэрозольное разбавление [1, 3, 9];

использование устойчивых (в англоязычной литературе – «robust») инструментальных параметров (скорость подачи образца в распылитель, мощность генератора, расстояние между горелкой и конусом, потенциал на линзе-экстракторе), приводящих к уменьшению как интенсивности сигнала, так и матричного влияния [1, 10–12];

применение подходящих способов градуировки [5, 6].

Необходимо отметить, что элементы, оказывающие матричное влияние, могут сами быть аналитами, тогда их отделение до стадии измерения невозможно, а увеличение коэффициента разбавления раствора может привести к уменьшению концентрации определяемых микроэлементов ниже пределов обнаружения. Поэтому одним из наиболее действенных способов компенсации матричного влияния является применение подходящих способов градуировки:

сочетание внешней градуировки с одним или несколькими внутренними стандартами [2, 10–18];

применение для внешней градуировки растворов с матричным составом, сопоставимым с составом анализируемых растворов (в англоязычной литературе – «matching calibration») [2, 19–21];

метод изотопного разбавления или метод стандартных добавок [2, 5, 22, 23].

Методы изотопного разбавления и стандартных добавок, будучи дорогостоящими и продол-

жительными по времени, требующими наличия множества специальных реактивов особой степени чистоты, в том числе изотопно-смещенных трасеров, используются только в редких случаях, когда требуется особая точность результатов. Чаще всего применяют внешнюю градуировку по многоэлементным эталонным растворам с точно известной концентрацией определяемых элементов в нужном диапазоне. В этом случае для коррекции матричного влияния принято использовать внутренние стандарты, которые отсутствуют в пробе и вводятся в раствор непосредственно перед измерением. Выбор внутреннего стандарта основан на таких параметрах, как чувствительность, потенциал ионизации, атомная масса, которые должны быть близки аналогичным показателям определяемых элементов [11, 15].

Такой способ позволяет вносить коррекцию на дрейф сигнала в процессе измерений и учитывать матричное влияние:

$$C_x = C_{\text{ст.}} (I_x/I_{\text{ст.}}) \cdot (I_{\text{ст.}}^{\text{вн.ст.}}/I_x^{\text{вн.ст.}}), \quad (1)$$

где I_x и $I_{\text{ст.}}$ – значения интенсивности определяемого элемента; C_x , $C_{\text{ст.}}$ – концентрации определяемого элемента; $I_x^{\text{вн.ст.}}$ и $I_{\text{ст.}}^{\text{вн.ст.}}$ – интенсивность внутреннего стандарта в анализируемом образце и внешнем стандарте (образце сравнения) соответственно. Для повышения точности результатов оправдано использование нескольких внутренних стандартов [17, 18]. В этом случае коррекция интенсивности сигнала изотопа каждого определяемого элемента проводится с учетом изменения интенсивности сигналов нескольких (чаще двух) ближайших по массе изотопов используемых внутренних стандартов. Например, для определения наиболее интересных для геохимиков редкоземельных элементов в работе [17] используют два внутренних стандарта – рутений и рений. Масса рутения меньше массы самого легкого изотопа (^{139}La), а масса рения больше массы самого тяжелого изотопа (^{175}Lu). В качестве внутреннего стандарта можно также использовать изотопно-смещенный трасер одного из определяемых элементов [14, 18].

В некоторых работах в целях коррекции матричного влияния предлагают использовать для градуировки образцы сравнения, которые по матричному составу аналогичны анализируемым образцам [16, 18, 20, 21, 24]. Например, в [18, 20] в качестве образца сравнения использовали стандартный образец – BHVO-1, в [21] – JB-1, а в [24] – BHVO-2. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с применением эта-

лонных многоэлементных растворов или стекол за счет идентичного способа химической подготовки образцов сравнения и анализируемых образцов, а также сопоставимого кислотно-солевого макросостава тех и других растворов. Существенным недостатком является возможное отличие значений концентрации, принятых для стандартных образцов и используемых для градуировки, от истинных значений. Для того чтобы избежать этих проблем, необходимо использовать в качестве образцов сравнения наиболее полно и точно аттестованные стандартные образцы [20].

Перспективно также применять для градуировки образцы сравнения, приготовленные из многоэлементных эталонных растворов с добавлением реактивов, имитирующих матрицу анализируемых растворов [5, 6].

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальной оценке неспектрального матричного влияния на чувствительность микроэлементов при их определении методом МС-ИСП в растворах после сплавления геологических образцов с метаборатом лития и выбор подходящих образцов сравнения для коррекции матричного влияния.

Экспериментальная часть

В работе использовали отечественные и международные геологические стандартные образцы состава естественных горных пород: базальты BHVO-1, BHVO-2, BCR-2 (USGS), граниты СГ-3 (Россия), G-2 (USGS), габбро – СГД-2А (Россия).

Методика химической подготовки твердых образцов для перевода определяемых элементов в раствор, реактивы и оборудование подробно описаны в [20].

Все измерения выполнены на ИСП-масс-спектрометре высокого разрешения «Element» фирмы «Finnigan Mat» (Германия) в Аналитическом центре ИГМ СО РАН. Набор определяемых элементов, их изотопов и разрешение, применяемое при проведении измерений, а также операционные параметры и условия съемки приведены в табл. 1.

Приготовление растворов для внешней градуировки

При МС-ИСП анализе растворов после сплавления использовали внешнюю градуировку № 1 по многоэлементному раствору CMS-1 фирмы «Inorganic Ventures» после разбавления исходного раствора с концентрацией определяемых элементов 10 мкг/мл весовым методом в три

Т а б л и ц а 1

Операционные параметры и условия съемки

Мощность ВЧ-генератора	1250 W
Отраженная мощность	≤10 W
Пробоподающий поток газа (Ar)	1,2 л/мин
Охлаждающий газовый поток	14 л/мин
Дополнительный газовый поток	0,9 л/мин
Разрешение (М/ΔМ)	LR 300
Диапазон сканирования масс	интервал масс 89–238 в режиме peak jumping
Тип сканирования	электрическое (Escan)
Количество сканирований массового диапазона	45
Детектирование	цифровое
Изотопы (разрешение)	⁸⁹ Y(LR), ¹³⁹ La(LR), ¹⁴⁰ Ce(LR), ¹⁴¹ Pr(LR), ¹⁴⁶ Nd(LR), ¹⁴⁷ Sm(LR), ^{151,153} Eu(LR), ¹⁵⁷ Gd(LR), ¹⁵⁹ Tb(LR), ¹⁶³ Dy(LR), ¹⁶⁵ Ho(LR), ¹⁶⁶ Er(LR), ¹⁶⁹ Tm(LR), ¹⁷² Yb(LR), ¹⁷⁵ Lu(LR), ²³² Th(LR), ²³⁸ U(LR)
Образование оксидов	Ba/BaO < 0,1%

Т а б л и ц а 2

Состав образцов сравнения для градуировок

Градуировка	Образцы сравнения	Концентрации определяемых элементов в растворе, мкг/л	Концентрация HNO ₃ , %	Концентрация LiBO ₂ , мг/л
№ 1 CMS-1	1	0,01269	4,99	–
	2	0,10394	5,00	–
	3	0,98954	4,94	–
№ 2 CMS-1 + LiBO ₂	1	0,01246	4,99	94,45
	2	0,09744	5,26	91,69
	3	0,99881	5,00	94,96
№ 3 BHVO-1	1	0,0091–1,2436	4,96	101,3

этапа. В табл. 2 приведен состав полученных образцов сравнения. Уровень содержания HNO_3 соответствовал анализируемым растворам после разложения ($5\% \text{HNO}_3$), так как концентрация кислоты влияет на сигнал аналитов [11, 12, 26, 27].

Была также приготовлена аналогичная серия образцов сравнения для градуировки № 2 с добавлением соответствующего количества метабората лития (табл. 2), который является основным матричным компонентом растворов геологических образцов после сплавления при соотношении образец : плав = 1:3.

Раствор стандартного образца базальта BHVO-1 использовали для внешней градуировки № 3 после разложения в соответствии с той же методикой пробоподготовки, что и для анализируемых образцов [20]. Используемая при градуировке концентрация определяемых элементов в растворах BHVO-1 была рассчитана на основании аттестованных значений, приведенных в [25].

В качестве внутреннего стандарта использовали In, добавляя его весовым методом в анализируемые растворы и образцы сравнения непосредственно перед измерениями. Концентрация In во всех растворах составляла 1 мкг/л.

Т а б л и ц а 3

Чувствительность определяемых элементов, (Имп/с)/(мкг/л)

Элемент	Градуировка		
	№ 1	№ 2	№ 3
Y	68 263	67 920	63 908
La	98 997	97 850	97 359
Ce	103 027	101 840	101 075
Pr	106 523	104 339	103 818
Nd	109 203	106 468	105 398
Sm	107 187	104 533	103 940
Eu	107 831	104 228	106 679
Gd	104 083	103 188	104 328
Tb	103 931	102 555	103 410
Dy	127 233	125 558	129 436
Ho	122 767	122 268	126 433
Er	123 850	122 778	128 842
Tm	123 613	120 640	127 242
Yb	123 267	119 368	125 427
Lu	119 223	117 175	121 578
Th	153 371	150 126	156 971
U	156 641	153 627	163 202

Протокол МС-ИСП измерения включал последовательное измерение растворов с увеличением концентрации определяемых и матричных элементов:

- 1) бланк – раствор $\text{HNO}_3 + \text{In}$,
- 2) раствор 1 (градуировка № 1),
- 3) раствор 1 (градуировка № 2),
- 4) раствор 2 (градуировка № 1),
- 5) раствор 2 (градуировка № 2),
- 6) раствор 3 (градуировка № 1),
- 7) раствор 3 (градуировка № 2),
- 8) раствор 1 (градуировка № 3),
- 9) растворы стандартных геологических образцов с одинаковым коэффициентом разбавления, соответствующим раствору 1 (градуировка № 3).

Результаты и обсуждение

При построении градуировочных графиков с использованием разных образцов сравнения отмечается изменение чувствительности определяемых элементов при переходе от растворов в HNO_3 (градуировка № 1) к растворам, содержащим помимо азотной кислоты метаборат лития (градуировка № 2), концентрация которого соответствует содержанию в анализируемых растворах. Для всех определяемых элементов чувствительность в азотной кислоте выше, однако различия незначительны (от 0 до 3%) для всех элементов (табл. 3). Таким образом, влияние метаборатной матрицы при таком разбавлении не значительно и для большинства определяемых элементов практически полностью компенсируется с помощью внутреннего стандарта.

При использовании в качестве образца сравнения раствора ВНВО-1, в котором кроме метабората лития содержится силикатная матрица, установлено, что чувствительность определяемых элементов также меняется по сравнению с градуировкой № 1. Чувствительность для Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb меньше, чем в азотной кислоте, а для Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U больше, т.е. соотношение значений чувствительности меняется в зависимости от массы определяемого элемента. Аналогичная закономерность наблюдается при сравнении с градуировкой № 2. Наибольшие различия отмечены для Y (7 и 6%) и U (5 и 6%), для остальных элементов разница составляет 1–5% (табл. 3). Таким образом, силикатная матрица оказывает более существенное влияние на чувствительность определяемых микроэлементов.

Расчет концентраций в растворах выполняли по формуле:

$$C_x = (I_x / \text{Ч}_x) \cdot (I_{\text{ст. вн.ст.}} / I_x^{\text{вн.ст.}}), \quad (2)$$

где Ч_x – чувствительность элемента, определяемая по методу наименьших квадратов как тангенс угла наклона градуировочного графика в координатах «интенсивность сигнала – концентрация».

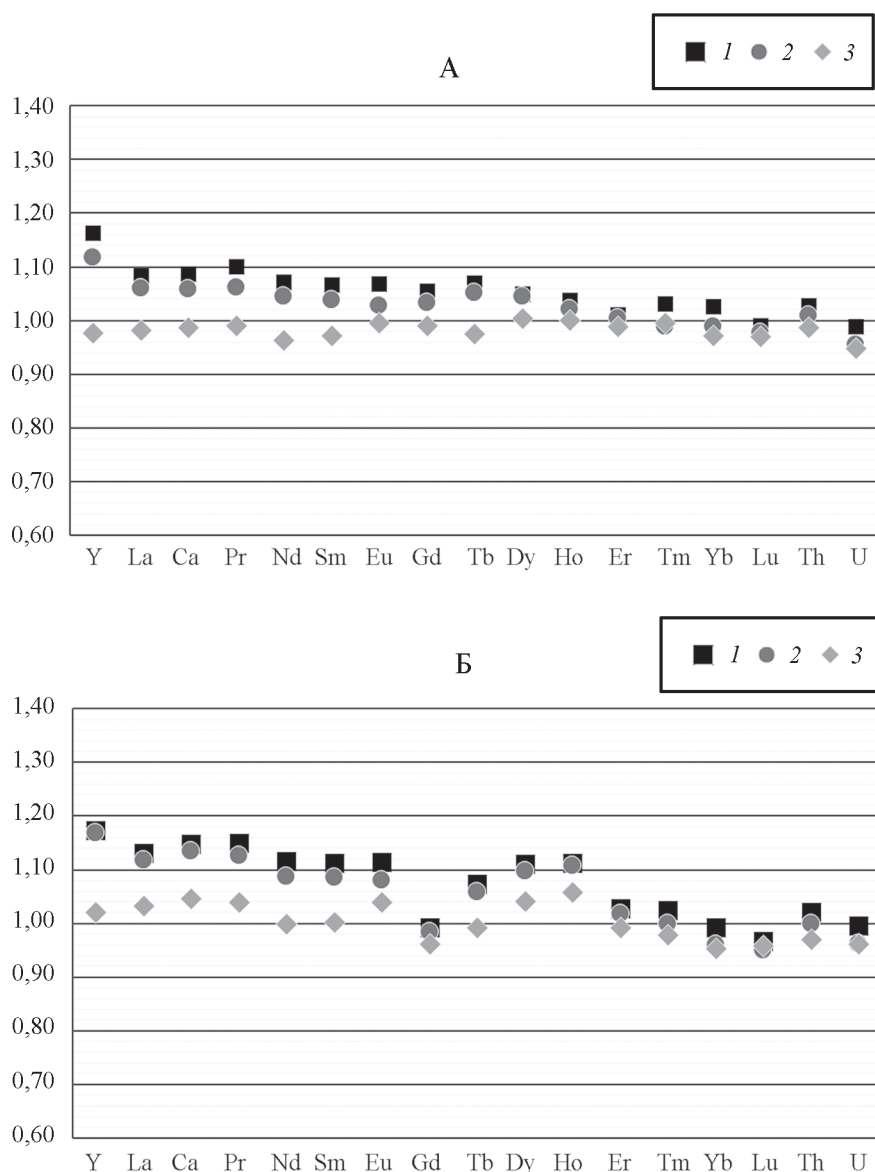
Результаты МС-ИСП определения концентраций микроэлементов в стандартных геологических образцах, полученные с использованием разных образцов сравнения (градуировки № 1–3) в сочетании с внутренним стандартом, приведены в табл. 4.

Сравнение данных, полученных по градуировкам № 1 и № 2, с аттестованными значениями для ВНВО-2 и ВСР-2 свидетельствует о том, что большая часть результатов в пределах погрешности согласуется с аттестованными значениями, при этом отмечается занижение концентраций наиболее легкого элемента Y (больше чем на 10%). По градуировке № 1 отклонения для иттрия составляют 16 и 14% в случае ВНВО-2 и ВСР-2 соответственно. При расчете по градуировке № 2 занижение несколько меньше и составляет 10–12%. Отклонение концентраций остальных элементов в ВНВО-2 и ВСР-2 не превышает 10% (рисунок).

Результаты, полученные для гранитов СГ-3 и G-2, свидетельствуют о занижении концентраций, полученных по градуировкам № 1 и № 2, более чем на 10% не только для Y, но еще и для некоторых легких редкоземельных элементов (рисунок). Вероятно, влияние силикатной матрицы в этих растворах более существенное по сравнению с растворами базальтов ВНВО-2 и ВСР-2.

Использование градуировки № 3, где образец сравнения по матричному составу соответствует анализируемому раствору, обеспечивает получение результатов с наименьшими отклонениями от аттестованных значений для всех элементов во всех стандартных образцах. Разница между средними значениями концентрации и аттестованными значениями составляет в основном от 1 до 5% (рисунок).

Таким образом, дана экспериментальная оценка необходимости учета неспектрального матричного влияния при определении 17 микроэлементов в растворах геологических образцов в целях снижения погрешности анализа даже при разбавлении до 0,01% общего содержания



Отклонение МС-ИСП-результатов ($C_{\text{атт}}/C_{\text{мс-исп}}$), полученных по градуировкам № 1–3, от аттестованных значений для BHVO-2 (А) и G-2 (Б)

солей. Использование для внешней градуировки эталонных растворов в азотной кислоте и растворов с добавлением метабората лития для имитации матрицы в сочетании с внутренним стандартом обеспечивает получение корректных результатов МС-ИСП анализа при определении большинства элементов, однако результаты определения иттрия занижены во всех стандартных образцах более чем на 10%. При анализе гранитов с более высоким содержанием кремния отмечается отклонение от аттестованных значений не только для иттрия, но и для некоторых легких редкоземельных элементов.

Использование в качестве образца сравнения раствора BHVO-1 приводит к снижению по-

грешности МС-ИСП определения 17 изученных микроэлементов в растворах всех стандартных образцов. В данном случае анализируемые растворы и образец сравнения характеризуются не только сходным кислотно-солевым составом, но и близким уровнем содержания определяемых элементов. В связи с этим съемка такого раствора не повышает уровень «памяти» прибора и не влияет на последующий анализ, что может происходить после измерения эталонных образцов сравнения с концентрацией, существенно превышающей уровень концентрации микроэлементов в анализируемых растворах. Таким образом, применение градуировки № 3 вместо серии многоэлементных эталонных растворов

не только гарантирует получение корректных результатов определения изученных микроэлементов, но и обеспечивает практическое удоб-

ство за счет сокращения времени МС-ИСП измерений, что является немаловажным фактором при рутинном анализе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inductively coupled plasma mass spectrometry handbook / Ed. S.M. Nelms. CRC Press: Boca Raton. 2005. 485 p.
2. Agatemor C., Beauchemin D. // *Analytica chimica acta*. 2011. Vol. 706. N 1. P. 66 (DOI: 10.1016/j.aca.2011.08.027).
3. Wilschefski S., Baxter M.R. The Clinical biochemist. Reviews / Australian Association of Clinical Biochemists. 2019. Vol. 40. N 3. P. 115 (DOI: 10.33176/AACB-19-00024).
4. Cuadros-Rodrigues L., Bagur-Gonzalez M.G., Sanchez-Vinas M. et al. // *Journal of Chromatography A*. 2007. Vol. 1158. P. 33.
5. Carter J.A., Barros A.I., Nobrega J.A., Donati G.L. // *Frontiers of Chemistry*. 2018. Vol. 6. Article 504.
6. Bulska E., Wagner B. // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 374. 20150369 (<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0369>).
7. Скворцова Л.Н., Подпругин А.С. // *Вестник томского государственного университета*. 2014. № 382. С. 234.
8. Большов М.А., Карандашев В.К., Цизин Г.И., Золотов Ю.А. // *Журнал аналитической химии*. 2011. Т. 66. № 6. С. 564.
9. Barros A.I., Pinheiro F.S., Amaral C.D.V., Lorencatto R., Nobrega J.A. // *Talanta*. 2018. Vol. 178. P. 805.
10. Карандашев В.К., Лейкин А.Ю., Жерноклеева К.В. // *Журнал аналитической химии*. 2014. Т. 69. № 1. С. 26.
11. Осипов К.Б., Серегина И.Ф., Большов М.А. // *Аналитика и контроль*. 2014. Т. 18. № 2. С. 150.
12. Stevart I.I., Olesik J.W. // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 1998. Vol. 13. P. 1313.
13. Rodushkin I., Ruth T. // *Reference Materials by High Resolutions Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry*. JAAS. 1997. Vol. 12. P. 1181.
14. Makishima A., Nakamura E. // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2006. Vol. 30. N 3. P. 245.
15. Bayon G., Barrat J.A., Etounbleau J. et al. // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2009. Vol. 33. N 1. P. 51.
16. Michael C., Henderson B., Lythgoe P.R., Tseis K.J. // *Journal of Geosciences and Environment Protection*. 2019. Vol. 7. P. 82 (<http://www.scirp.org/journal/gep>).
17. Doherty W. *Spectrochim. Acta*. 1989. Vol. 44 B. N 3. P. 263.
18. Eggins S.M., Woodhead J.D., Kinsley L.P. // *Chem. Geol.* 1997. Vol. 134. P. 311.
19. Wagner B., Syta O., Kepa L. et al. // *J. Mex. Chem. Soc.* 2018. Vol. 62. N 2. P. 323 (DOI: <http://dx.doi.org/10.29356/jmsc.v.62i.2.410>).
20. Николаева И.В., Палесский С.В., Козьменко О.А., Аношин Г.Н. // *Геохимия*. 2008. № 7. С. 1085.
21. Imai N. // *Analytical Sciences*. 1990. Vol. 6. P. 389.
22. Carignan J., Hild P., Mevelle G. et al. // *Geostandards Newsletter*. 2001. Vol. 25. N 2–3. P. 187.
23. Arevalo R., Bellucci J., McDonough W. // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2010. Vol. 34. N 4. P. 327.
24. Николаева И.В., Палесский С.В., Карпов А.В. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 5. С. 26. (ISSN 2500-1019. EISSN 2413-1830).
25. Jochum K.P., Nohl U., Herwig K., Lammel E., Stoll D., Hofmann A.W. // *GeoReM: A New Geochemical Database for Reference Materials and Isotopic Standards* (URL: <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de>) (дата обращения 20.03.2021).
26. Ретивов В.М., Котов Д.В., Волков П.А., Лобанова А.В., Лебедева Л.А., Красильщик В.З., Булатицкий К.К., Санду Р.А. *Научные технологии*. 2013. № 3. С. 67.
27. Сапрыгин А.В., Голик В.М., Кисель Т.А., Трепачев С.А. *Аналитика и контроль*. 2003. Т. 7. № 4. С. 340.
28. Экспериментальные образцы (http://igc.irk.ru/ru/content_page/item/2401-sgd-2a-gso-8670-2005).
29. Мысовская И.Н., Смирнова Е.В., Ложкин В.И., Пахомова Н.Н. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 75. № 10. С. 60.

Информация об авторах

Николаева Ирина Викторовна – ст. науч. сотр. Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 630090, пр. Академика Коптюга, 3, канд. хим. наук, inikol@igm.nsc.ru;

Палесский Станислав Владиславович – ст. науч. сотр. Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 630090, пр. Академика Коптюга, 3, канд. хим. наук, stas@igm.nsc.ru;

Кравченко Анна Александровна – инженер Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 630090, пр. Академика Коптюга, 3, annjonas@mail.ru.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021;
одобрена после рецензирования 12.10.2021;
принята к публикации 14.11.2021.