

УДК 543:(225+423.1)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА КОЛИБРИ-2 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ Na, K, Li И Rb В ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ¹

© Е. В. Шабанова, А. А. Зак, Г. А. Погудина,
И. М. Хмелевская, В. И. Меньшиков²

Статья поступила 26 сентября 2014 г.

Появление приборов с многоканальными детекторами позволило одновременно определять группу щелочных металлов в растворах разнообразного состава методом пламенной фотометрии. В статье описаны этапы разработки методики одновременного нахождения содержания Na, K, Li и Rb в образцах горных пород, минералов, руд, донных и терригенных отложений, почв и золы. Представленная методика соответствует III категории точности Классификации методов лабораторного анализа (ОСТ 41-08-212-04). В методике матричные и спектральные влияния компенсированы благодаря выбору оптимальных условий измерения аналитических сигналов и градуировки по растворам природных ГСО.

Ключевые слова: пламенная фотометрия; спектрометр Колибри-2; геохимические объекты.

Знание о содержании щелочных металлов в горных породах, рудах и минералах необходимо для классификации этих объектов и, в некоторых случаях, их геохронологической датировки [1–3]. К точности результатов определения K и Rb, используемым для установления возраста, предъявляются повышенные требования [4]. Надёжное определение щелочных металлов в техногенных образцах помогает оценить степень и выделить источники загрязнения окружающей среды [5]. Как известно, проблемы анализа геологических проб, так называемого геоанализа, связаны со специфическими особенностями объектов исследования и требованиями к аналитическим данным [2, 3, 6]. Выбор метода и методик анализа или их сочетаний осложняется:

- широчайшим разнообразием состава и свойств исследуемых образцов;
- необходимостью определения элементов, желательно одновременно, в диапазонах от кларковых до рудных содержаний;
- жёсткими требованиями к достоверности результатов, экспрессности их получения (высокой производительности) и экономической привлекательности.

Применимость аналитического метода к конкретным задачам геоанализа связана с минимальным содержанием элемента, которое может быть определено конкретной методикой с заданной доверительной вероятностью; а также точностью, правильностью и прецизионностью результатов анализа (например [2] и др.).

Развитие современной аппаратуры для атомно-эмиссионного анализа, в том числе и для пламенной фотометрии (ПФ), позволяет одновременно регистрировать широкий спектральный диапазон и надёжно измерять интенсивности спектральных линий, что, в свою очередь, улучшает точность результатов анализа. Однако существующие методики определения Na, K, Li и Rb в геохимических объектах методом ПФ являются одноэлементными (для каждого аналита применяется специфический буфер; спектры регистрируются с помощью ФЭУ) и используют водные растворы для градуировки (табл. 1) [6–9]. В перечисленных методиках минимизация химических влияний, вызванных взаимодействием атомов аналита с компонентами конденсированной или газовой фаз, достигается такими приёмами как: оптимизация условий атомизации — выбор типа пламени и скорость подачи раствора; введение в раствор спектроскопического буфера или модифицирование основы; градуировка по стандартным образцам, близким по химическому составу к анализируемым пробам, или применением метода добавок. Кроме того, при расчете аналитического параметра (АП) каждой линии используется амплитуда сигнала без учета интенсивности фона в окрестности этой линии. Матричные эффекты в методиках [7, 8] учитываются применением метода добавок при определении содержания аналитов. Для современного оборудования с фотодиодной регистрацией спектров, которое позволяет одновременно записывать аналитические линии щелочных элементов, требуется адаптация существующих методик или создание новых. Поэтому, при пополнении приборной базы ИГХ СО РАН многоканальным спектрометром «Колибри-2» [10] с атомизатором от прибора Perkin-Elmer модель 303 и ПО «Атом» [11], появилась необходимость в методике одновременного определе-

¹ Работа подготовлена по материалам доклада на международном симпозиуме «Применение анализаторов МАЭС в промышленности» (г. Новосибирск, 2014 г.)

² ФГБУН Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: shev@igc.irk.ru

Таблица 1. Характеристики некоторых методик определения щелочных элементов с помощью ПФ

Методика	Список определяемых элементов		$C_{\min}$, мас. %	Пробоподготовка			Тип пламени (T , °C)	Прибор	Способы расчёта		
	аналит	длина волны, нм		навеска, г	кислоты	буфер			АП	Концен- трации	
Спектрофото- метрическое высо- кочувствительное определение [7]	Na	589,0; 589,6	0,01*	0,5 – 1 (горные поро- ды); 0,1 – 0,5 (минералы)	H ₂ SO ₄ ,	Не используется	пропан – воздух (~2000)	монохро- матор УМ-2; ФЭУ-17/ ФЭУ-22	амплитуда сигнала	метод добавок	
	K	766,5	0,01*		HF,						
	Li	670,8	0,0001		HNO ₃						KCl (0,03 М)
	Rb	794,8	0,0001								
НСАМ № 61-С [8]	Na	589,0; 589,6	0,05	0,5	Не используется		ацетилен – воздух (~2800)	монохро- матор УМ-2; ФЭУ	амплитуда сигнала	метод добавок	
	K	769,9; 766,5	0,05								NaCl (0,85 М)
	Li	670,8	0,001								Не используется
	Rb	794,8	0,01								K ₂ SO ₄ (0,4 М)
СТП ИГХ-009–97 [9]	Na	589,0	0,03	0,1 – 0,5	HClO ₄ ,	Не используется	пропан – воздух (~2000)	спектрометр ДФС-12	амплитуда сигнала	метод ограничи- вающих стандартов	
	K	766,5	0,01		HF, HCl						KCl (0,05 М), NaCl (0,09 М)
	Li	670,8	0,00035								
	Rb	794,8	0,0002								

Примечание. Знаком «*» обозначены величины минимального контрольного опыта, обеспечиваемого по методике; АП — аналитический параметр, являющийся численной оценкой величины спектральной линии.

Таблица 2. Две серии аттестованных смесей

Обозначение АС		Аликвота (см ³), отбираемая от головного раствора с содержанием аналитов	
Название серии	Концентрация каждого аналита в растворе, мг/см ³	1 г/дм ³	100 мг/дм ³
Li, Rb, Cs	100	100	—
	8,0	16	—
	6,0	12	—
	4,0	8,0	—
	2,0	4,0	—
	1,0	2,0	—
	0,50	—	10,0
	0,10	—	2,0
	0,050	—	1,0
	0,025	—	0,5
	0,001	—	0,2
K, Na	100	100	—
	25,0	50	—
	20,0	40	—
	15,0	30	—
	10,0	20	—
	5,0	10	—
	2,0	4,0	—
	1,0	—	20
	0,50	—	10
	0,25	—	5,0
	0,10	—	2,0

ния щелочных элементов из одного раствора для снижения временных и экономических затрат.

Для твёрдых порошковых образцов было решено использовать рутинную пробоподготовку с кислотным разложением [12]. От каждого образца отбирают массу 0,20 г, которую помещают в платиновую чашку, смачивают водой и последовательно приливают концентрированные кислоты: 5 мл HClO₄ (осч.) и 15 мл HF (осч.). Смесь выпаривают до состояния влажных

Таблица 3. Операционные условия измерений

Давление газов в системе, кг/см ²	пропан – бутан	0,49
	воздух	2,1
Спектральный диапазон, нм		394 ÷ 874
Обратная линейная дисперсия, нм/мм		16
Базовая экспозиция, мс		10
Полная экспозиция, с		10
Время стабилизации пламени, с		10

солей, смачивают водой, снова выпаривают до прекращения выделения белых паров. Затем остаток смачивают дистиллированной водой и приливают 5,0 мл раствора HCl (осч.) (1:1), количественно переносят в мерные полипропиленовые колбы на 50 мл и доводят до метки дистиллированной водой. В приготовленных пробах концентрация составляет 4 М в фоновом растворе HCl. Для учёта содержания определяемых элементов в используемых реактивах с каждой партией проб параллельно проводят контрольный опыт. Приготовление аттестованных смесей K, Na, Li и Rb выполнено в виде двух серий (табл. 2), в которых каждая смесь получена последовательным разбавлением дистиллированной водой соответствующих аликуот головных растворов. Для каждой серии приготовлено из хлоридов металлов и дистиллированной воды по два головных раствора с концентрациями аналитов по 1 г/дм³ и 100 мг/дм³.

Операционные условия (табл. 3) подобраны эмпирическим путём. Выбор минимальной базовой экспозиции и оптимального времени стабилизации пламени, при которых наблюдалась максимальная интенсивность аналитического сигнала при его минимальном относительном среднеквадратичном отклонении (ОСКО), выполнен по спектрам растворов государственных стандартных образцов природного состава (ГСО). В табл. 4 дан список исследованных ГСО.

Таблица 4. Список используемых ГСО природного состава и содержания некоторых элементов в них

Стандартные образцы			Содержание						
Тип	Номер	Индекс	% мас.					10 ⁻⁴ % мас.	
			Al	Ca	Mg	Na	K	Li	Rb
Горные породы	4319–88	ДВА	9,6 ± 0,1	5,7 ± 0,1	1,9 ± 0,1	2,39 ± 0,04	0,70 ± 0,02	7,0 ± 2	11 ± 2,0
	4318–88	ДВБ	8,7 ± 0,1	4,7 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,73 ± 0,04	1,74 ± 0,03	10 ± 2	37 ± 2,0
	4322–88	ДВГ	8,1 ± 0,1	0,54 ± 0,04	0,42 ± 0,007	2,83 ± 0,04	2,76 ± 0,05	3300 ± 200	1500 ± 100
	4317–88	ДВМ	2,4 ± 0,1	3,2 ± 0,1	18,1 ± 0,2	0,13 ± 0,01	0,087 ± 0,004	9,0 ± 2	12 ± 2
	4321–88	ДВР	8,4 ± 0,1	2,1 ± 0,1	0,43 ± 0,2	2,61 ± 0,04	3,01 ± 0,05	40 ± 5	200 ± 10
	4323–88	ДВТ	6,6 ± 0,1	0,32 ± 0,4	0,24 ± 0,007	2,84 ± 0,04	3,89 ± 0,05	38 ± 4	450 ± 20
	8871–2007	ГБПг-1	8,4 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1	2,64 ± 0,06	1,87 ± 0,09	21 ± 3	55 ± 5
	520–84П	СГ-1А	7,3 ± 0,1	0,1 ± 0,02	0,33 ± 0,006	4,05 ± 0,04	3,44 ± 0,05	390 ± 20	1100 ± 100
	3333–85	СГ-3	5,6 ± 0,1	0,23 ± 0,02	0,060 ± 0,012	3,15 ± 0,04	3,85 ± 0,05	52 ± 4	140 ± 10
	8670–2005	СГД-2	7,9 ± 0,1	7,6 ± 0,1	4,1 ± 0,1	2,02 ± 0,52	2,57 ± 0,09	12 ± 2	80 ± 10
	4233–88	СДУ-1	0,51 ± 0,04	1,1 ± 0,1	25,2 ± 0,2	0,026 ± 0,004	0,0083 ± 0,0008	2,0 ± 0,3	н/д
	813–89П	СИ-1	0,23 ± 0,05	21,1 ± 0,1	12,5 ± 0,2	0,059 ± 0,021	0,28 ± 0,01	н/д	н/д
	1345–78	СНС-2	11,1 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,29 ± 0,01	7,4 ± 0,1	4,9 ± 0,04	31 ± 2	170 ± 10
	3191–85	ССЛ-1	8,8 ± 0,1	0,064 ± 0,014	1,5 ± 0,1	0,059 ± 0,01	2,96 ± 0,03	60	150 ± 10
	10171–2012	ССн-1	11,9 ± 0,2	0,35 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,88 ± 0,06	14,9 ± 0,2	3,9 ± 0,3	776 ± 99
Руда	119/08*	ИАЦ-5-08	0,64	0,05	н/д	н/д	0,18 ± 0,01	н/д	н/д
Рыхлые отложения и осадки	3132–85	СГХ-3	8,7 ± 0,1	0,29 ± 0,2	0,96 ± 0,03	1,19 ± 0,04	2,02 ± 0,07	71 ± 4	77 ± 5
	3486–86	СГХМ-4	6,0 ± 0,1	0,37 ± 0,03	0,29 ± 0,02	1,24 ± 0,04	1,84 ± 0,03	150 ± 10	190 ± 30
	7126–94	БИЛ-1	7,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,45 ± 0,05	1,83 ± 0,07	37 ± 4	93 ± 5
	7176–95	БИЛ-2	7,5 ± 0,2	5,1 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,31 ± 0,07	1,25 ± 0,04	8,5 ± 1,6	39 ± 1
Почва	5359–90	СП-1	5,5 ± 0,1	1,2 ± 0,1	0,61 ± 0,02	0,59 ± 0,02	1,9 ± 0,1	25 ± 6	84 ± 7
Зола	7177–95	ЗУА-1	14,3 ± 0,2	3,5 ± 0,2	0,89 ± 0,05	0,10 ± 0,01	0,49 ± 0,02	96 ± 9	22 ± 3

* Стандартный образец предприятия ОАО «Иргиредмет» (Иркутск); «н/д» — нет данных; курсивом выделены ориентировочные значения.

Таблица 5. Условия вычисления ОАП для используемых линий аналитов

Аналит	Длина волны, нм	Фон			Интенсивность			
		поиск границ линии		способ вычисления	поиск центра линии		вычисление	
		способ	число диодов, шт.		способ	диапазон, шт.	способ	число диодов, шт.
Na	589,00	МЗП	20	слева	полуавтоматический	2	интеграл	3
	589,59	МЗП	45	ПМП				3
K	766,49	МЗП	25	слева				6
	769,90	МЗП	25	справа				6
Li	670,78	МЗП	10	ПМП				1
Rb	780,03	МИФ	10	ПМП				3
	794,76	МИФ	10	ПМП				3

Примечание. МЗП — минимум в зоне поиска; МИФ — минимум интенсивности фона; ПМП — под максимумом пика.

После кислотного разложения в растворах природных образцов сохраняются высокие содержания породообразующих элементов (таких как Al, Ca, Mg), которые могут оказывать сильные матричные влияния [13].

Для вычислений величин аналитических сигналов каждой линии любого аналита были найдены оптимальные аналитические параметры (ОАП), т.е. конкретный способ расчёта интенсивности и учёта фона в некоторой окрестности аналитического сигнала, который максимально устойчив к изменению химического состава исследуемых образцов и учитывающий особенности спектральной аппаратуры. Выбор ОАП каждой спектральной линии всех четырёх аналитов

выполнен согласно рекомендациям [14]. При выборе учитываются такие показатели аналитического сигнала как величина, ширина и скошенность. Оптимальный аналитический параметр характеризуется наибольшей величиной сигнала, при наименьших размерах его ширины и скошенности. В табл. 5 приведены условия вычислений ОАП, задаваемые в ПО «Атом».

На рис. 1 показаны относительные систематические погрешности (ОСП), рассчитанные по результатам одновременного определения аналитов в образцах природного состава с помощью градуировки по водным растворам. Наблюдаемые большие систематические погрешности для 4 М фонового раствора,

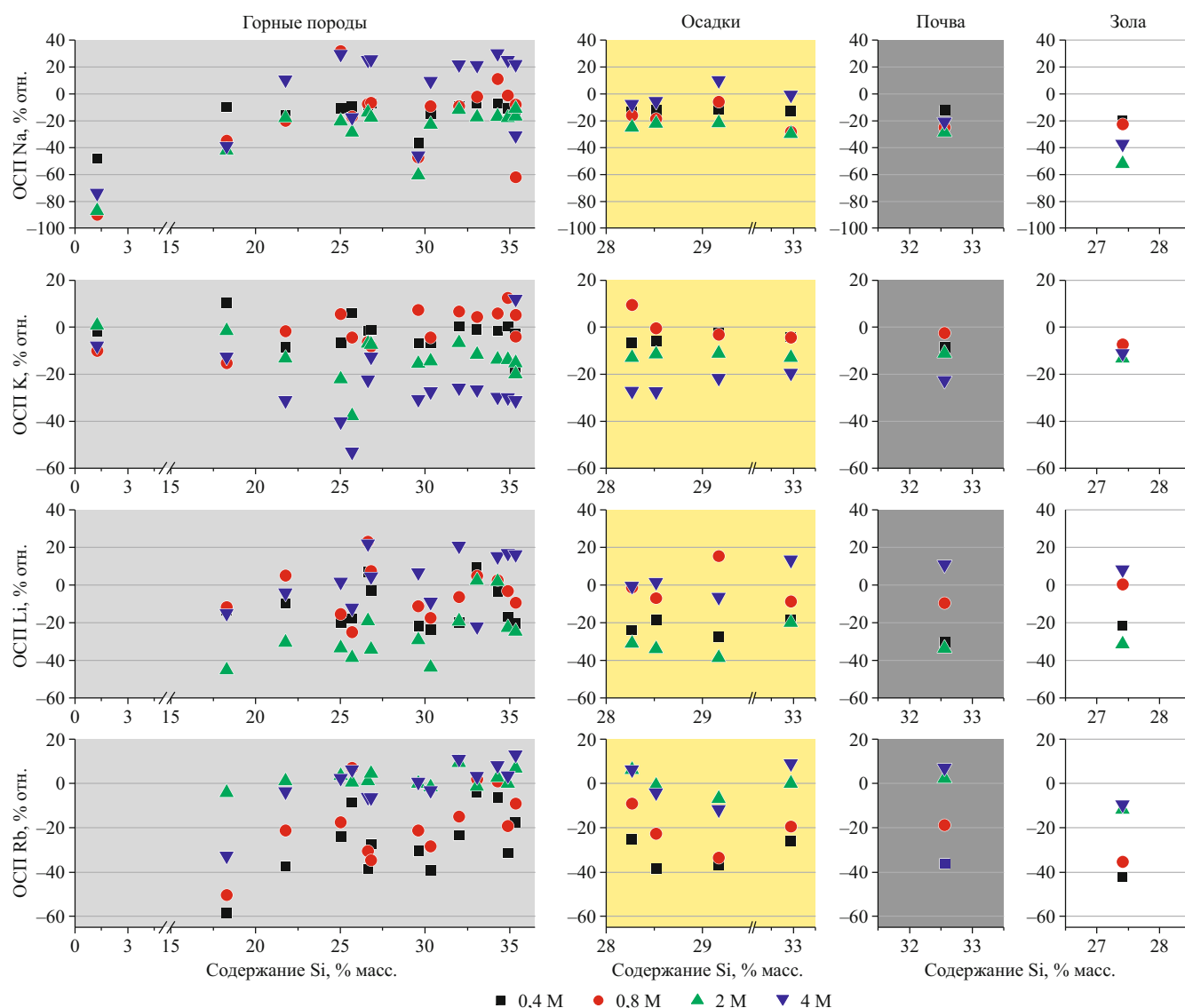


Рис. 1. Относительные систематические погрешности, рассчитанные по результатам одновременного определения аналитов в образцах природного состава

не уменьшаются и при снижении его молярных концентраций (2; 0,8 и 0,4 М). Этот эффект может быть связан с химическими влияниями, вызванными различием состава анализируемых и градуировочных растворов. Использование водных аттестованных смесей не компенсирует матричные влияния в природных образцах, поскольку смеси готовятся из чистых солей определяемых элементов. Подтверждением этого является рис. 2, на котором показаны линии Ca 422,67 нм и молекулярные полосы CaO 554 нм и Ca(OH)₂ 622 нм в спектрах образцов с разным содержанием кальция, как в карбонатных (ГСО № 813–89П СИ-1) и силикатных (ГСО № 8670–2005 СГД-2) породах, так и в донных отложениях (ГСО № 7176–95 БИЛ-2). Для образцов, в которых Ca ≥ 4 % мас., наблюдается значительное занижение результатов определения Na и К. Для снижения анионного эффекта, влияющего на оптическую плотность пламени [6], далее исследовались только 0,4 М по HCl растворы.

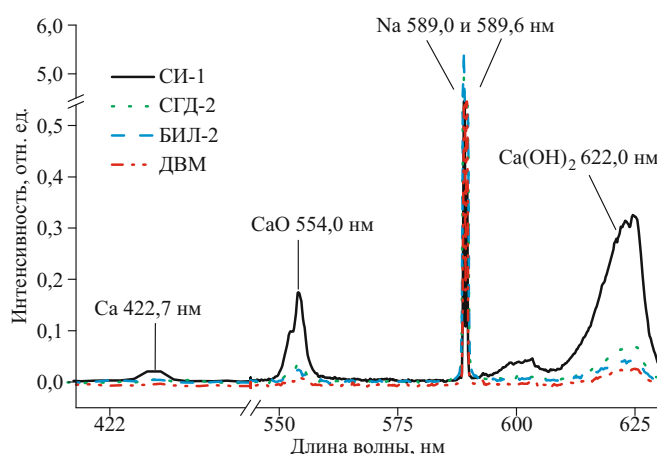


Рис. 2. Участки спектров государственных стандартных образцов с линиями кальция, натрия и молекулярных полос

Нивелировать состав растворов проб и аттестованных смесей можно с помощью спектроскопическо-

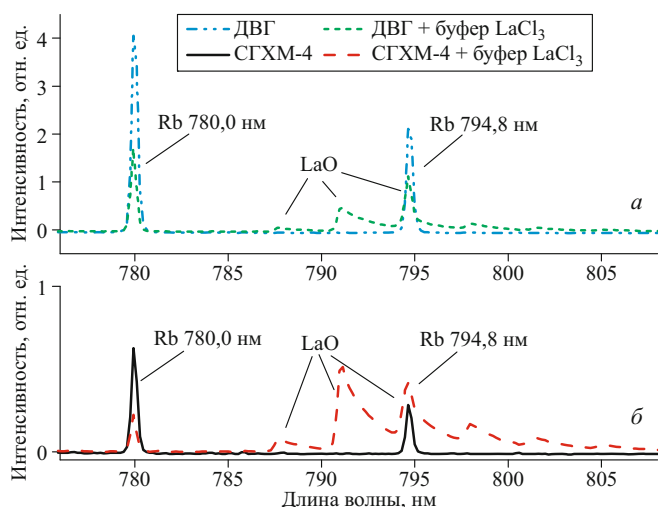


Рис. 3. Участки спектров государственных стандартных образцов без и с добавлением спектроскопического буфера LaCl_3

го буфера, например, CsCl_3 или LaCl_3 [15, 16]. Буфер CsCl_3 неприемлем, так как далее эти растворы используются для определения содержания цезия. Добавление буфера LaCl_3 привело к снижению интенсивности аналитических сигналов аналитов и перекрывает линии рубидия молекулярной полосой LaO (рис. 3).

При рутинном анализе экономически не выгодно проводить дополнительное моделирование растворов и их разделение согласно типам пород. Исключить необходимость дополнительного буферирования растворов можно составлением набора образцов для градуирования из природных и техногенных ГСО. Для разрабатываемой методики список градуировочных образцов составлен таким образом, что охватывает наибольший диапазон определяемых содержаний четырёх аналитов. Градуировочные зависимости (рис. 4), построенные по этим образцам в билогариф-

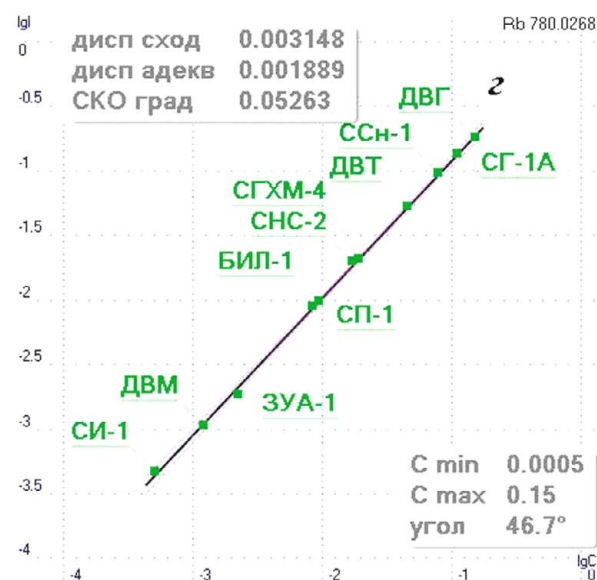
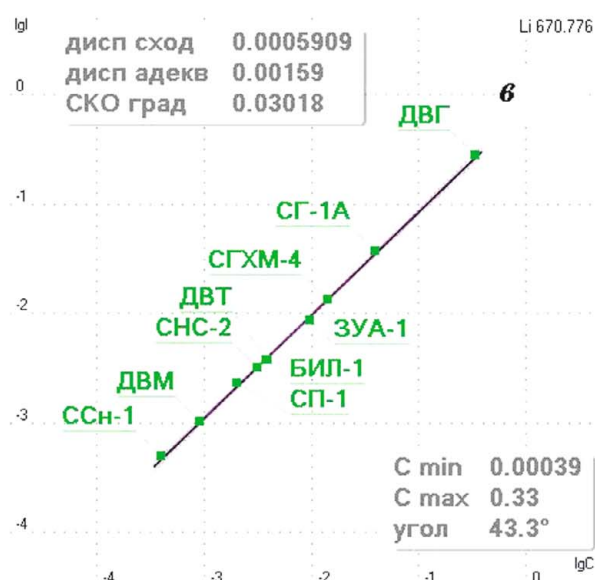
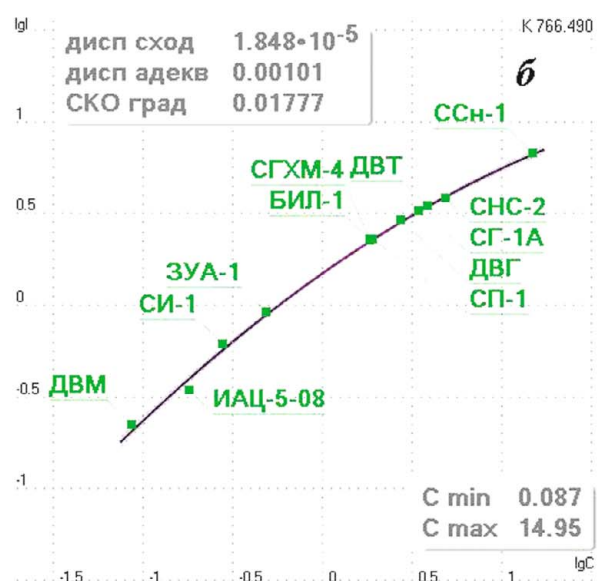
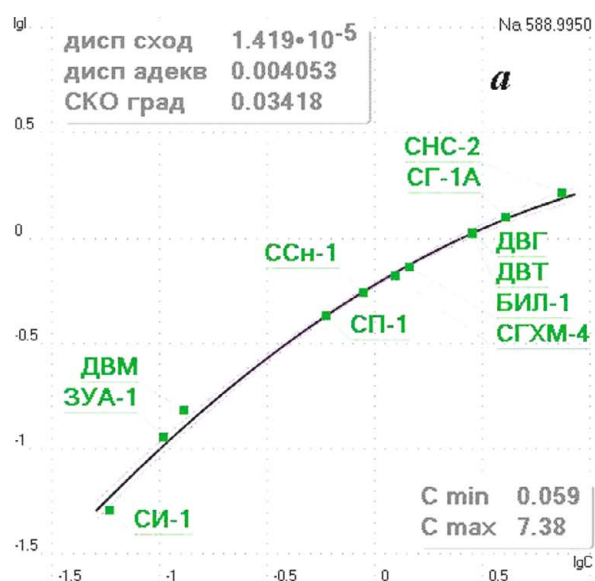


Рис. 4. Типичные градуировочные графики для определения щелочных металлов по линиям: а — Na 589,0 нм; б — K 766,5 нм; в — Li 670,8 нм; г — Rb 780,0 нм

мических координатах с использованием эмпирической формулы Ломакина – Шайбе, для Na и K аппроксимированы методом наименьших квадратов 2-й степени, а Li и Rb — 1-й степени, т.е. линейные. Заметим, что для всех градуировок погрешность предсказания при обучении (СКО градуировки) не превышает 5 % и угол наклона близок 45°, что свидетельствует об удовлетворительном учёте процессов атомизации, проходящих в пламени.

На рис. 5 показаны результаты определения аналитов в тестовой выборке зашифрованных природных ГСО разнообразного состава из табл. 4. Для результатов определения Na и Rb, рассчитанных с помощью градуировки по водным АС, наблюдаются систематические занижения, а в случае градуировок по растворам ГСО природного состава — отсутствие статистически значимых систематических погрешностей для результатов. Однако такого влияния матрицы не наблюдается для результатов определения K и Li.

Обработка полученных данных в соответствии с ОСТ 41-08-205-04 [17] позволила рассчитать метрологические характеристики разработанной методики. В таблице 6 даны показатели точности определения аналитов в разных диапазонах для разработанной и других существующих методик [8, 9].

Разработанная методика даёт более узкие границы погрешности по сравнению с методикой НСАМ № 61-С [8], что подтверждает её соответствие III категории точности согласно [18]. Близкие показатели точности между разработанной методикой и представленной в [9] при разных способах градуирования (метод постоянного графика и метод ограничивающих стандартов), можно объяснить одинаковой пробоподготовкой геохимических объектов.

Таким образом, разработана методика одновременного определения группы щелочных металлов методом пламенной фотометрии с помощью спектрометра Колибри-2 в горных породах, минералах, рудах, донных и терригенных отложениях, почвах и золах. В методике используется: пробоподготовка — кислотное разложение (концентрация HCl в фоновом растворе составляет 0,4 М); введение растворов в пламя в течение 40 с (стабилизация плазмы — 10 с; измерение трёх параллельных по 10 с; базовая экспозиция составляет 10 мс); интегральные с учетом фона на интервале ОАП для линий Na 588,995 и 589,5924 нм; K 766,49 и 769,896 нм; Li 670,776 нм; Rb 780,0268 и 794,7603 нм; градуировка по растворам постоянного списка стандартных образцов разнообразного природного и техногенного состава (переградуировка проводится ежеквартально и после смены реактивов). Контроль правильности по стандартным образцам согласно [18] выполняется вместе с каждой партией проб с помощью теста, в котором анализируются зашифрованные природные ГСО разнообразного состава.

В связи с тем, что одновременное определение аналитов проводится из одного раствора, снижены

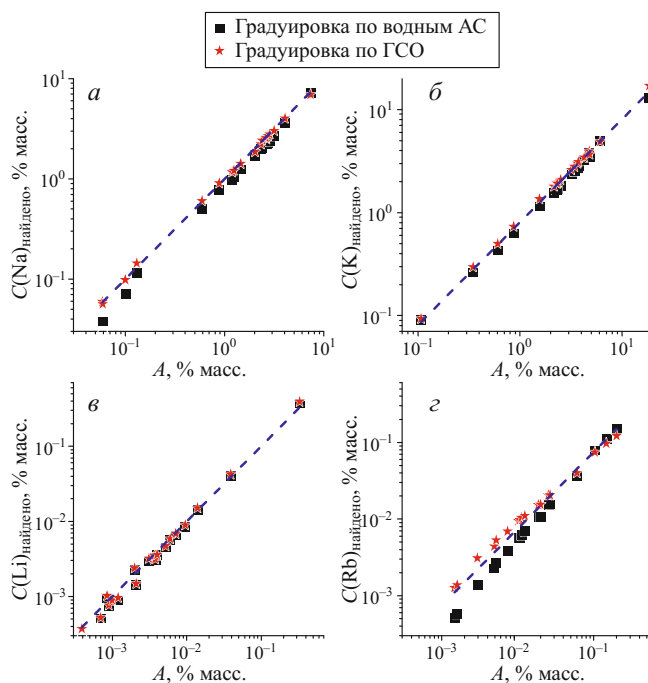


Рис. 5. Результаты определения аналитов в тестовой выборке, рассчитанные по разным градуировкам: а — натрий; б — калий; в — литий; з — рубидий

временные и экономические затраты. Представленная методика соответствует III категории точности Классификации методов лабораторного анализа [18] и предназначена для поисковых и оценочных геолого-геохимических исследований, выполнения геоэкологического мониторинга состояния территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Ч. 1 / Под ред. В. В. Поликарпочкина. — Новосибирск: Наука, 1981. С. 3 – 37.
2. Методические основы исследования химического состава горных пород, руд и минералов / Под ред. Г. В. Остроумова. — М.: Недра, 1979. — 400 с.
3. Столярова И. А., Филатова М. П. Атомно-абсорбционная спектроскопия пламени при анализе минерального сырья. — Л.: Недра, 1981. — 151 с.
4. Химический анализ горных пород и минералов / Под ред. Н. П. Попова, И. А. Столяровой. — М.: Недра, 1974. — 248 с.
5. Морис П. Поверхность и межфазные границы в окружающей среде от наноуровня к глобальному масштабу. — М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2013. — 540 с.
6. Полужков Н. С. Методы анализа по фотометрии пламени. — М.: Химия, 1967. — 308 с.
7. Каленчук Г. Е. Об определении калия, натрия, лития, рубидия и цезия в горных породах и минералах методом фотометрии пламени. / Химический анализ минералов и их химический состав. — М.: Наука, 1964. С. 3 – 15.
8. НСАМ № 61-С. Определение лития, натрия, калия, рубидия, цезия в силикатных горных породах и в минералах-силикатах пламенно-спектрофотометрическим методом. — М.: ФГУП «ВИМС», 2006. — 24 с.
9. СТП ИГХ-009-97. Горные породы, почвы и донные отложения. Методика выполнения измерений массовой доли калия, натрия, лития, рубидия и цезия методом фотометрии пламени. — Иркутск: ИГХ СО РАН, 1997. — 18 с.

Таблица 6. Диапазоны определяемых содержаний аналитов и их точность определения в соответствии с разработанной и существующими методиками

Аналит	Диапазон определяемых содержаний, % мас.		Показатель точности определения при $P = 0,95 \pm \Delta \times C$, % мас.		
	$C_{\min}$	$C_{\max}$	Разработанная методика	Методика НСАМ № 61-С [8]	СТП ИГХ-009-97 [9]
Na	0,015	0,037	0,40	0,47	н/д
	0,037	0,074			
	0,074	0,15	0,23	0,39	0,29
	0,15	0,37		0,31	
	0,37	0,74		0,24	
	0,74	1,5		0,20	
	1,5	3,7	0,14	0,16	0,15
	3,7	7,4		0,11	
K	0,008	0,017	0,29	0,45	н/д
	0,017	0,042			0,25
	0,042	0,083			
	0,083	0,17	0,14	0,39	0,15
	0,17	0,42		0,31	
	0,42	0,83		0,24	
	0,83	1,7	0,12	0,20	0,10
	1,7	4,2		0,16	
	4,2	8,3	0,06	0,11	0,05
	8,3	17		0,07	
Li	0,00023	0,00093	0,39	0,59	0,35
	0,00093	0,0023		0,55	
	0,0023	0,0046	0,20	0,51	0,16
	0,0046	0,0093		0,49	
	0,0093	0,023		0,43	
	0,023	0,046	0,15	0,35	
	0,046	0,093		0,27	
	0,093	0,23		0,22	
	0,23	0,46		0,17	
Rb	0,00045	0,00091	0,26		0,41
	0,00091	0,0018			
	0,0018	0,0045		0,59	
	0,0045	0,0091	0,17		0,16
	0,0091	0,018			
	0,018	0,045	0,16	0,49	
	0,045	0,091		0,41	
	0,091	0,18		0,35	
	0,18	0,45	н/о	0,27	0,06

Примечание. «н/д» — нет данных; «н/о» — не определялось.

10. Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Саушкин М. С., Зарубин И. А., Селюнин Д. О. Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Специальный выпуск. С. 35 – 39.
11. Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В., Семёнов З. В., Панкратов С. В., Ващенко П. В. Современное программное обеспечение для проведения АЭС анализа. Программа «Атом» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. 2. С. ?? – ??.
12. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии / Пер. с англ. В. А. Трофимова. — М.: Химия, 1984. — 428 с.
13. Боровик-Романова Т. Ф. Спектрально-аналитическое определение щелочных и щелочноземельных элементов. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1956. — 180 с.
14. Шабанова Е. В., Васильева И. Е., Непомнящих А. И. Модель аналитического параметра спектральной линии в атомно-эмиссионном анализе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 1. С. 11 – 18.
15. Пупышев А. А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. — М.: Техносфера, 2009. — 784 с.
16. Матвеева А. Г., Гапеева С. И. Применение малогабаритного спектрометра «Колибри-2» для анализа литиевых соединений методом пламенной фотометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 90 – 94.
17. ОСТ МПР 41-08-205-04. Управление качеством аналитической работы. Методики количественного химического анализа. Разработка, аттестация, утверждение. — М.: ФГУП ВИМС, 2004. — 105 с.
18. ОСТ МПР 41-08-212-04. Управление качеством аналитической работы. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. — М.: ФГУП ВИМС, 2004. — 24 с.