

УДК 543.423.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДАХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМОЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

© 2022 г. М. А. Васильева^{a, b}, Е. В. Полякова^{a, b, *}

^aНовосибирский национальный исследовательский государственный университет
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090 Россия

^bИнститут неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук
просп. Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: e.polyakova.niic@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 19.05.2022 г.

В атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой интенсивности аналитических линий с низкими энергиями возбуждения увеличиваются в присутствии легкоионизируемых элементов. Для компенсации этого эффекта при определении щелочных и щелочноземельных металлов предложено добавлять в растворы проб и в градуировочные растворы дополнительные матричные элементы с потенциалами ионизации менее 6 эВ (Rb, Ba, Sm, La, Eu, In, Al, Ga). Концентрацию дополнительного элемента выбирали, исходя из постоянства аналитических сигналов аналитов и магниевого отношения $Mg(II)/Mg(I)$; она составила 75–100 мг/л. Такая концентрация недостаточна для значимого изменения температуры или электронной плотности, т.е. добавленный элемент не является спектральным буфером. Прием применен при анализе поровых вод донных отложений озера Б. Баган (солонцеватый тип минерализации), правильность анализа подтверждена способом введено–найденно.

Ключевые слова: АЭС МП, матричные влияния, спектральный буфер, легкоионизируемые элементы.

DOI: 10.31857/S0044450222120179

В последнее время атомно-эмиссионную спектроскопию с микроволновой плазмой (АЭС-МП) все чаще используют для решения аналитических задач [1–3]. Основной проблемой, мешающей распространению метода, на наш взгляд, являются матричные эффекты, в той или иной степени присущие всем вариантам атомно-эмиссионной спектроскопии. Систематические исследования процессов, происходящих в азотной микроволновой плазме атмосферного давления, или механизмов возбуждения тех или иных линий, в литературе не описаны, однако имеются работы, посвященные матричным эффектам [4–6]. В настоящее время известно, что наибольший матричный эффект в микроволновой плазме оказывают элементы с низким первым потенциалом ионизации [6] (в отличие от индуктивно связанной плазмы, где наибольшую роль играет второй потенциал ионизации [7, 8]). Это не только щелочные металлы (большинство исследователей демонстрируют такие эффекты на примере натрия [9, 10]), но и любые элементы с $E_{\text{ион}}$ 4–6 эВ.

Что касается самих аналитических линий, то увеличение интенсивности сигналов наблюдается для линий с энергией возбуждения ($E_{\text{возб}}$) < 4 эВ, а для линий с большей $E_{\text{возб}}$ сигналы, напротив, снижаются. Это также является причиной высоких пределов обнаружения (ПО) в МП таких неметаллов, как Si, P, As, Se, Te, S и др. Аналогичное поведение сигналов примесей наблюдается и в аргонной МП [10].

Природные воды – обширная группа объектов, традиционно считающихся “несложными” для анализа ввиду простой пробоподготовки. Высокие ПО тяжелых металлов не позволяют использовать АЭС-МП для определения качества питьевой воды [11], однако в экологических исследованиях природных вод зачастую требуется определение основных металлов, в частности щелочных и щелочноземельных. Эти элементы с энергией ионизации 4.34 эВ (K)–7.64 эВ (Mg), присутствующие в различных количествах, существенно влияют на аналитические сигналы (АС) друг друга, что приводит к неправильным резуль-

Таблица 1. Выбранные аналитические линии

Элемент, линия	$E_{\text{возб}}$, эВ	$E_{\text{ион}}$, эВ
K(I)769.897	1.61	4.339
K(I)766.491	1.62	
Li(I)670.784	1.85	5.390
Na(I)589.592	2.1	5.138
Na(I)588.995	2.11	
Ba(I)553.548	2.24	5.210
Ba(II)493.408	2.51	
Ba(II)455.403	2.72	
Ca(I)422.673	2.93	6.111
Ca(II)396.847	3.12	
Ca(II)393.366	3.15	
Mg(I)285.213	4.34	7.644
Mg(I)383.829	5.94	
Mg(II)280.271	4.42	
Mg(II)279.553	4.43	

татам даже при разбавлении пробы. Для коррекции матричных влияний в АЭС-анализе используют различные способы:

- Классический прием – использование адекватных образцов сравнения [12, 13] (уравнивание матричного состава проб и градуировочных растворов) – неприменим при анализе природных объектов, где в одной партии образцы могут значительно отличаться по составу;

- Применение внутреннего стандарта в АЭС-МП [14, 15] осложняется необходимостью тщательно подбирать внутренние стандарты по энергиям возбуждения и ионизации, с тем чтобы изменение сигналов в присутствии матричных элементов было одинаковым. Такой способ хорош при определении малых количеств элементов;

- Метод добавок [16] трудоемок, особенно при анализе большой серии образцов, к тому же требует линейного вида градуировочной функции. Для щелочных и щелочноземельных металлов линейный диапазон в МП мал.

- Спектральные буферы традиционно применялись в пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии [17] и дуговым варианте АЭС [18–20] для подавления ионизации аналитов, при этом концентрация такой добавки составляла более 1%. В настоящее время использование солей цезия (>1%) в качестве спектрального буфера рекомендовано в том числе и производителями МП-спектрометров [21–23].

Последний способ – наиболее простой, так как растворы буфера и пробы подаются из разных пробирок и смешиваются при помощи Y-образного приспособления перед попаданием в распы-

лительную камеру. Однако высокое содержание цезия в таких растворах не только влияет на срок службы горелки, но и значительно снижает интенсивность ионных линий за счет смещения равновесия атом–ион.

При анализе проб, в которых содержание элементов значительно варьирует, возможно “уравнять” их состав введением элемента, концентрация которого будет выше, чем собственных матричных элементов, но не настолько, чтобы общее содержание солей приблизилось к критическому значению.

Цель данной работы – изучение возможности использования элементов с потенциалами ионизации <6 эВ в качестве дополнительных стабилизирующих элементов в АЭС-МП для определения щелочных и щелочноземельных металлов (Ca, Mg, Ba, K, Na, Li).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование и реактивы. Работа выполнена на атомно-эмиссионном спектрометре с микроволновой плазмой Agilent 4100 MP-AES (Agilent Technologies, США). Для получения плазмообразующего газа – азота использовали генератор 4107 Nitrogen Generator (Agilent Technologies, США). Мощность плазмы 1 кВт (фиксирована). Давление азота в распылителе и положение просмотра (0 соответствует центру горелки) для всех аналитических линий каждого из определяемых элементов оптимизировали с помощью встроенных в программное обеспечение функций. Выбранное давление составило 240 кПа (возможный диапазон 80–240 кПа), а положение просмотра – 0 для всех элементов (для линий кальция положение просмотра составило 120). Выбранные аналитические линии приведены в табл. 1.

Для приготовления растворов использовали тридистиллированную воду, азотную и соляную кислоты ос. ч. Исходные одноэлементные растворы металлов Ca, Mg, Ba, Na, K с концентрацией 1 г/л (для выбора условий) готовили растворением в тридистиллированной воде: нитрата натрия ч. д. а., хлорида бария ч., хлорида кальция обезвоженного ч., хлорида калия ос. ч., нитрата магния б-водного х. ч.

Растворы для градуировочной серии готовили с использованием стандартных многоэлементных растворов (МЭС) (СКАТ, Новосибирск, Россия): МЭС 1 (Al, Ca, Cd, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn (по 50 мг/л), Li (10 мг/л)) и МЭС 3 (As, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Te (по 50 мг/л), Ba, Sr (по 20 мг/л), Ag, Au, Be (по 10 мг/л), Hg (5.0 мг/л)).

Растворы элементов, используемых в качестве стабилизирующих (Al, Eu, Sm, Rb, Ba, Li, In, Ga, La), с концентрацией 0.4 г/л готовили из: алюминия металлического, оксида европия(III), оксида

самария(III), хлорида рубидия, оксида бария, карбоната лития, индия металлического, галлия металлического, нитрата лантана(III) (все х. ч.).

Оценка матричного эффекта. Для оценки матричного эффекта, вызванного натрием, использовали растворы МЭС с концентрацией 2 мг/л, содержащие дополнительно 0–3000 мг/л натрия, и растворы натрия той же концентрации без примесей. Для учета возможного сигнала примеси в присутствии натрия (результат контрольного опыта) вычитали сигнал “пустой” матрицы без примесей. Матричный эффект рассчитывали как отношение сигнала элемента в присутствии натрия к сигналу элемента в “чистом” растворе 2 М HNO_3 .

Выбор оптимальных концентраций. Для выбора оптимальных условий регистрировали сигналы аналитов при их концентрации 1 и 10 мг/л. Концентрацию азотной кислоты варьировали в диапазоне 0–6 мас. %. Концентрацию стабилизирующих элементов варьировали в диапазоне 25–100 мг/л для In, Ga, Sm, Eu, Li, Ba, Rb, и 25–200 мг/л для La и Al при содержании азотной кислоты 2 мас. %. Для учета возможного вклада контрольного опыта из полученных в присутствии дополнительных элементов или кислоты аналитических сигналов вычитали сигналы от “пустой матрицы” (без добавления аналита).

При выборе концентрации стабилизирующего элемента ориентировались на постоянство АС аналитов и постоянство условий в плазме, оцениваемых по магниевому отношению $\text{Mg(II) } 280.271/\text{Mg(I) } 285.213$ [24, 25]. Магниевое отношение рассчитывали для двух серий растворов (1 и 10 мг/л аналитов) в присутствии каждого изучаемого стабилизирующего элемента.

Анализ поровых вод. Для анализа поровые воды разбавляли в 10, 40 и 100 раз растворами стабилизирующего элемента с концентрацией 75 мг/мл (100 мг/л для Al и 70 мг/л для Ga) в 2%-ной HNO_3 . Градуировочные растворы готовили разбавлением МЭС аналогичным раствором стабилизирующего элемента. Сигналы стабилизирующих элементов при определении концентрации не учитывали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Матричный эффект, вызываемый щелочными металлами. Одним из наиболее значимых недостатков микроволновой плазмы с конструкцией Хаммера (приборы Agilent) как источника возбуждения спектров является значительный матричный эффект, вызываемый элементами с низкими потенциалами ионизации. На рис. 1 приведены значения интенсивности различных линий элементов в присутствии натрия, нормированные на их интенсивность в “чистом” растворе

2 М HNO_3 без матричного элемента (матричный эффект, $I_{\text{отн}}$). Видно, что как для атомных, так и для ионных линий с энергией возбуждения ниже ~4 эВ при концентрации натрия до 1000 мг/л (часто встречаются в природных водах) происходит увеличение аналитического сигнала. Для сравнения приведен матричный эффект для $\text{Zn(I) } 213.857$ ($E_{\text{возб.}} 5.8$ эВ). Кроме того, горизонтальными пунктирными линиями показан интервал $\pm 10\%$ от начального значения, в котором аналитические сигналы демонстрировали бы постоянство. Как видно из рис. 1, во-первых, подобрать внутренний стандарт проблематично, так как матричные эффекты для линий внутреннего стандарта и аналита должны коррелировать; во-вторых, использование спектрального буфера в высокой концентрации значительно снижает аналитические сигналы линий со средней и высокой энергией возбуждения, что приводит к существенному росту пределов обнаружения.

Выбор концентрации азотной кислоты. В большинстве случаев пробы вод консервируют добавлением азотной кислоты. При использовании готовых многоэлементных стандартных растворов для приготовления градуировочных серий следует учитывать их исходную кислотность. Упомянутые в литературе случаи использования спектральных буферов в АЭС-МП предполагают использование растворов с концентрацией азотной кислоты 2–4%, поэтому изучали диапазон 0–6% HNO_3 .

Для большинства как атомных, так и ионных линий увеличение кислотности раствора приводит к снижению АС (рис. 2), что особенно заметно при концентрации аналита 10 мг/л и подтверждает полученные ранее данные [26]. При условии изменения АС в пределах доверительного интервала оптимальный диапазон содержания азотной кислоты в растворах составил 1–2.5 мас. %. Таким образом, в выбранном диапазоне концентрации азотной кислоты АС не изменяются значимо, что позволяет при необходимости не соблюдать кислотность очень строго.

Выбор стабилизирующего элемента и его концентрации. Для приготовления градуировочных растворов наиболее часто используют коммерческие многоэлементные смеси, поэтому их максимальная концентрация, как правило, ограничена единицами–десятками мг/л. В качестве стабилизирующих матричных элементов тестировали элементы с потенциалами ионизации до 6 эВ: Rb (4.18), Ba (5.21), Li (5.39), Sm (5.60), La (5.61), Eu (5.67), In (5.79), Al (5.98), Ga (6.00). Из литературы следует, что значимое изменение температуры и электронной плотности при добавлении натрия ($E_{\text{ион}} = 5.14$ эВ) происходит при концентрации около 1 мас. %, а индия и галлия – 0.25 мас. % [5, 6]. При этом горелка используемого нами обо-

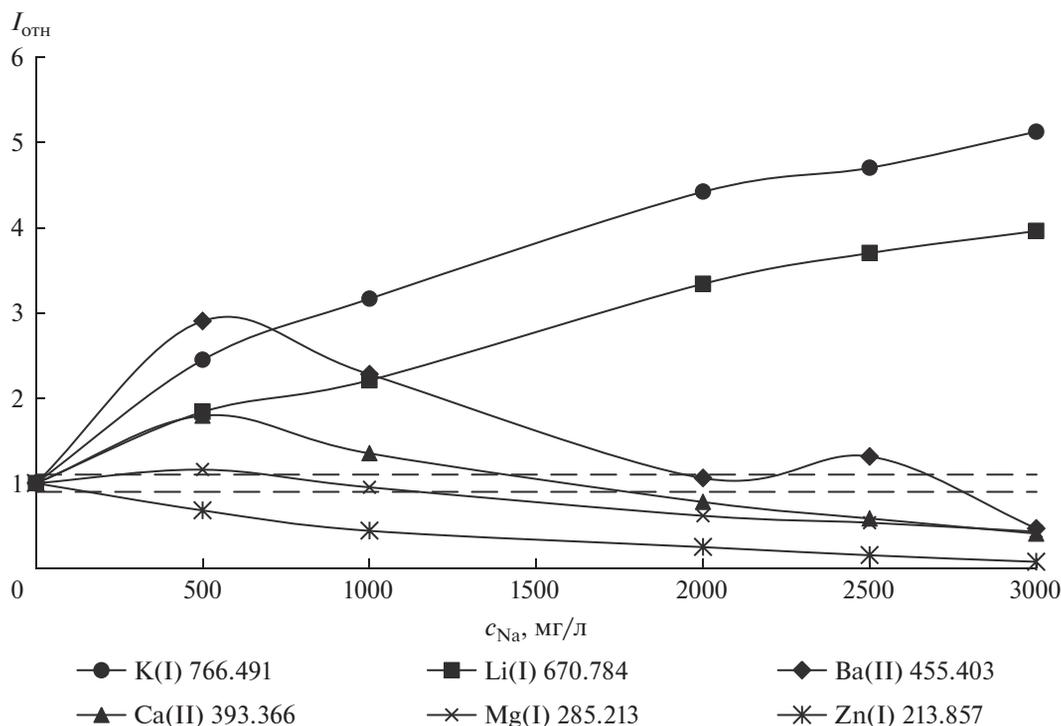


Рис. 1. Матричный эффект ($I_{отн}$) в присутствии натрия для некоторых аналитических линий.

рудования чрезвычайно чувствительна к высоким концентрациям вводимых растворов: возможны ее деформация и выход из строя. Поскольку максимальная концентрация аналитов в градуировочных сериях, приготовленных из коммерческих многоэлементных стандартов, составляла 10 мг/л, представлялось целесообразным использовать не слишком высокую концентрацию стабилизирующих элементов. В качестве оптимальной концентрации стабилизирующего элемента выбирали такую концентрацию, при которой наблюдалось постоянство магниевого отношения и аналитических сигналов. В присутствии лития (рис. 3а, 3б) магниевое отношение значительно снижалось, а аналитические сигналы отличались во всех экспериментальных точках для всех изученных линий, поэтому литий в дальнейших экспериментах не рассматривали.

В присутствии рубидия (рис. 3в, 3г) сигналы щелочных металлов и магния оставались более-менее постоянными, для кальция и бария необходимо использовать ионные линии. В присутствии бария аналитические сигналы всех элементов постоянны до его концентрации 75 мг/л, далее снижаются. В присутствии индия (рис. 3д, 3е) щелочные металлы и магний демонстрируют постоянные сигналы, в то время как для бария и кальция сигналы атомных линий несколько увеличиваются. Самарий, лантан, европий и алюминий (рис. 3ж, 3з) вызывают значительное изменение фона для

атомных линий кальция, что затрудняет обработку сигналов и особенно существенно при его низких концентрациях. Сигналы ионных линий щелочноземельных металлов изменяются меньше, чем атомных. В тоже время сигналы щелочных металлов постоянны. В присутствии галлия сигналы элементов постоянны при их концентрации 10 мг/л, а при концентрации 1 мг/л сигналы снижаются. В целом более стабильные АС при большей концентрации аналита (10 против 1 мг/л) наблюдаются в присутствии большинства стабилизирующих элементов. Таким образом, выбрали оптимально-компромиссные концентрации стабилизирующих элементов, они составили 75 мг/л для Rb, Ba, Sm, La, Eu, In, 100 мг/л для Al и 70 мг/л для Ga.

Анализ поровых вод. В присутствии выбранных количеств стабилизирующих элементов проанализировали пробы поровых вод донных отложений озера Большой Баган (Новосибирская область, солонцеватый тип минерализации, гидрокарбонатный класс [27]).

При анализе без добавления стабилизирующего элемента получены сходящиеся при различных разбавлениях (10, 40 и 100 раз) результаты определения натрия и магния (основные элементы), в то время как для элементов с меньшим содержанием (Ca, Ba, K, Li) при разных разбавлениях результаты различаются, что свидетельствует о наличии матричного эффекта со стороны натрия. В каче-

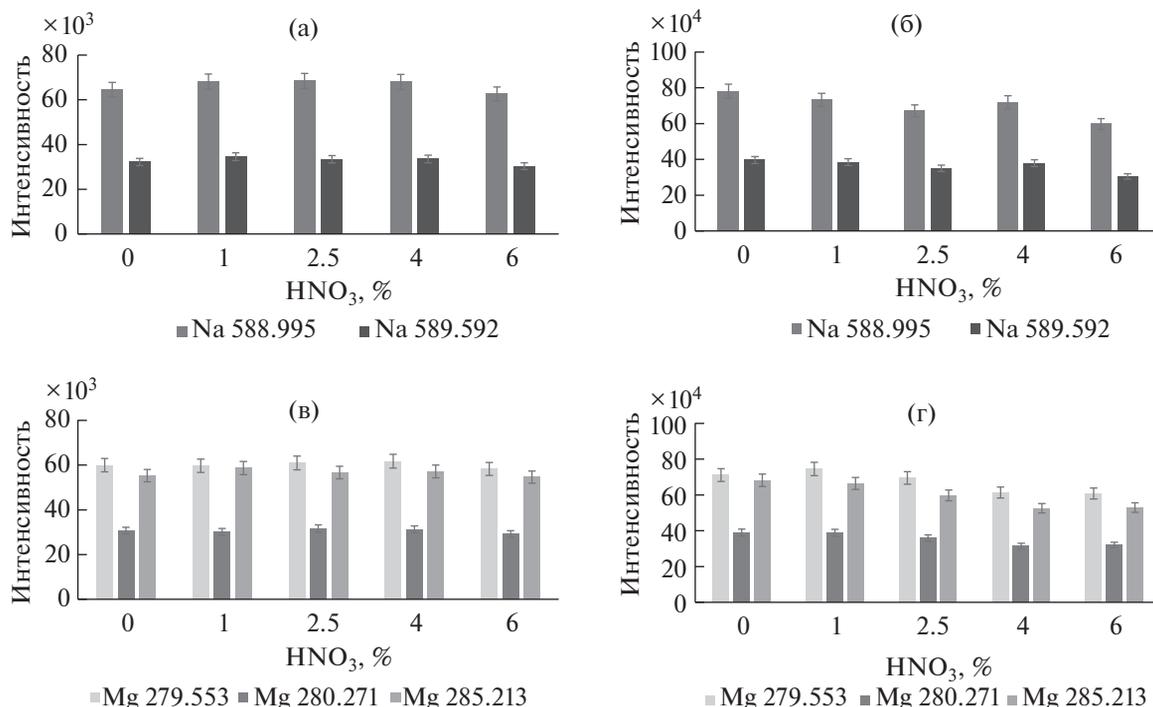


Рис. 2. Влияние концентрации HNO₃ на интенсивности сигналов линий Na ((а) – 1 мг/л, (б) – 10 мг/л) и Mg ((в) – 1 мг/л, (г) – 10 мг/л).

стве примера на рис. 4 приведены результаты определения натрия и калия. В присутствии стабилизирующего элемента (75 мг/л In) результаты анализа сходятся при разных разбавлениях пробы. В качестве примера на рис. 4 приведены также результаты определения Na и K при использовании добавленного индия в качестве внутреннего стандарта. Видно, что различие в энергиях возбуждения и ионизации для линий калия (1.61 и 4.339 эВ соответственно) и индия (3.02 и 5.785 эВ) слишком велико для применения индия в качестве эффективного внутреннего стандарта. Для натрия, несмотря на его более близкие характеристики (2.11 и 5.138 эВ), индий также не подходит в качестве внутреннего стандарта.

Выполнили анализ трех образцов, отличающихся глубиной отбора и содержанием основных элементов (табл. 2), способом введено—найдено при среднем разбавлении пробы, добавка увели-

чивала концентрацию элемента в 1.5–2 раза. Результаты хорошо воспроизводятся для разных проб, открываемость аналитов в основном лежит в диапазоне 90–110% (табл. 3, приведены данные для пробы 1).

Для устранения межэлементных влияний в АЭС-МП среди щелочных и щелочноземельных элементов опробован способ добавления стабилизирующего элемента с $E_{\text{ион}} < 6$ эВ. Концентрация стабилизирующего элемента недостаточна для изменения температуры или электронной плотности, т.е. он не является классическим спектральным буфером. Можно предположить, что стабилизирующий элемент снижает доступную энергию в плазме, а за счет преобладающей концентрации поддерживает одинаковые усло-

Таблица 2. Содержание (мг/л) аналитов в некоторых образцах поровых вод ($n = 4, P = 0.95$, в присутствии Rb)

Проба	Ca	Ba	Mg	Na	Li	K
1	46 ± 2	(21 ± 3) × 10 ⁻²	122 ± 6	(4.7 ± 0.5) × 10 ²	(81 ± 8) × 10 ⁻³	28 ± 2
2	52 ± 3	(15 ± 2) × 10 ⁻²	117 ± 6	(6.3 ± 0.6) × 10 ²	(11 ± 1) × 10 ⁻²	26 ± 2
3	61 ± 3	(18 ± 3) × 10 ⁻²	119 ± 7	(6.7 ± 0.7) × 10 ²	(12 ± 1) × 10 ⁻²	29 ± 2

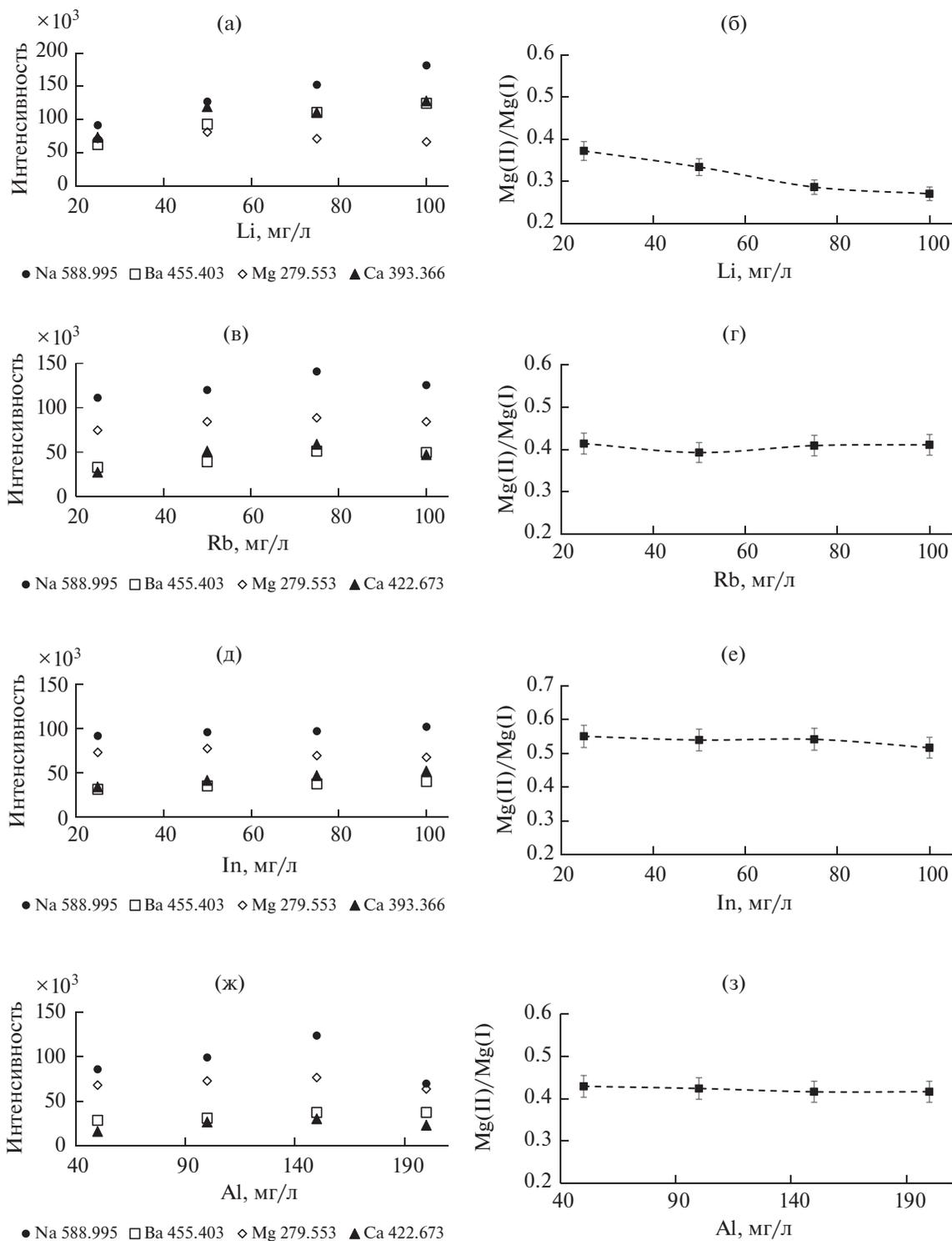


Рис. 3. Изменение интенсивности аналитических сигналов элементов (для концентрации 1 мг/л) и магниевого отношения в присутствии элементов: Li (а, б), Rb (в, г), In (д, е), Al (ж, з).

вия в пробе и в градуировочных растворах, что подтверждается постоянством магниевого отношения. В присутствии стабилизирующих элементов проанализированы пробы поровых вод озера

Б. Баган, правильность результатов подтверждена методом введено—найдено. Наилучшие результаты получены в присутствии Rb, La, In, Ga. Прием может быть рекомендован для определения дру-

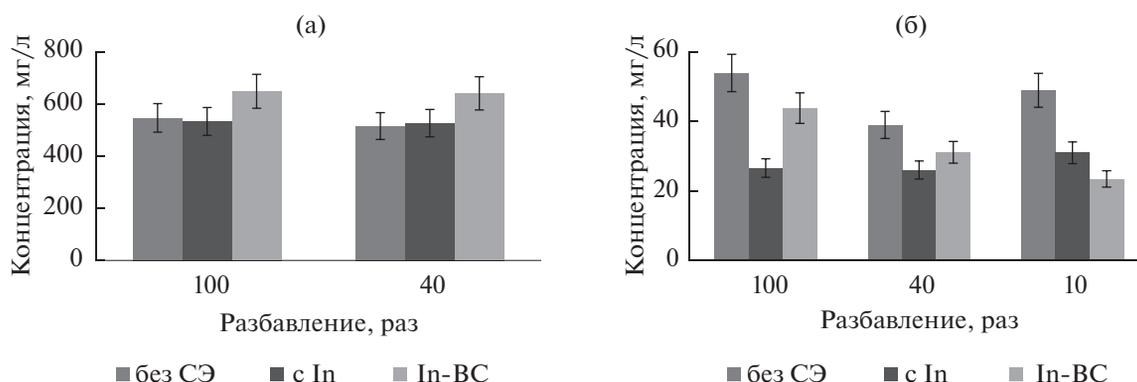


Рис. 4. Результаты определения Na (а) и К (б) в пробе поровых вод при различных разбавлениях без добавления стабилизирующего элемента (СЭ), с добавлением индия в качестве СЭ и при использовании индия в качестве внутреннего стандарта (BC).

Таблица 3. Открываемость (%), рассчитанная в присутствии различных стабилизирующих элементов для разбавленной пробы поровых вод

Определяемый элемент, аналитическая линия		Стабилизирующий элемент							
		Rb	Ba	Sm	La	Eu	In	Al	Ga
Ca	393.366 (II)	104	100	105	104	101	095	106	106
	396.847 (II)	104	99	105	98	98	97	105	102
	422.673 (I)	109	98	105	108	101	96	108	102
Mg	279.553 (II)	100	96	101	99	97	99	102	98
	280.271 (II)	101	98	100	96	98	96	102	98
	285.213 (I)	101	92	101	102	99	96	102	99
	383.829 (I)	101	93	101	99	96	98	104	97
Ba	455.403 (II)	111	—	113	102	107	94	108	107
	493.408 (II)	107	—	113	100	105	91	108	109
	553.548 (I)	110	—	*	109	104	85	108	110
Na	588.995 (I)	105	92	103	113	102	89	104	101
	589.592 (I)	108	92	105	109	100	92	103	99
Li	670.784 (I)	104	96	106	103	96	90	107	*
K	766.491 (I)	101	92	101	102	92	95	101	101
	769.897 (I)	104	91	107	103	91	96	103	99

* Концентрация элемента ниже предела обнаружения.

гих примесных элементов, линии которых имеют низкие и средние энергии возбуждения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХ СО РАН в области фундаментальных научных исследований, проект № 121031700315-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balaram V. Microwave plasma atomic emission spectrometry (MP-AES) and its applications – A critical review // Microchem. J. 2020. V. 159. Article 105483.
2. Müller A., Pozebon D., Dressler V.L. Advances of nitrogen microwave plasma for optical emission spectrometry and applications in elemental analysis: A review // J. Anal. At. Spectrom. 2020. V. 35. P. 2113.
3. Williams C.B., Amais R.S., Fontoura B.M., Jones B.T., Nobrega J.A., Donati G.L. Recent developments in microwave-induced plasma optical emission spectrometry and applications of a commercial Hammer-cavity instrument // Trends Anal. Chem. 2019. V. 116. P. 151.
4. Serrano R., Grindlay G., Gras L., Mora J. Evaluation of calcium-, carbon- and sulfur-based non-spectral interferences in high-power MIP-OES: Comparison with ICP-OES // J. Anal. At. Spectrom. 2019. V. 34. P. 1611.
5. Pelipasov O.V., Polyakova E.V. Matrix effects in atmospheric pressure nitrogen microwave induced plasma

- optical emission spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. V. 35. P. 1389.
6. Polyakova E.V., Pelipasov O.V. Plasma molecular species and matrix effects in the Hummer cavity microwave induced plasma optical emission spectrometry // *Spectrochim. Acta B.* 2020. V. 173. Article 105988.
 7. Chan G.C.-Y., Chan W.-T., Mao X., Russo R.E. Investigation of matrix effects in inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy using laser ablation and solution nebulization – Effect of second ionization potential // *Spectrochim. Acta B.* 2001. V. 56. P. 77.
 8. Chan G.C.-Y., Hieftje G.M. Investigation of plasma-related matrix effects in inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry caused by matrices with low second ionization potentials—identification of the secondary factor B // *Spectrochim. Acta B.* 2006. V. 61. P. 642.
 9. Jankowski K., Dreger M. Study of an effect of easily ionizable elements on the excitation of 35 elements in an Ar-MIP system coupled with solution nebulization // *J. Anal. At. Spectrom.* 2000. V. 15. P. 269.
 10. Zhang Z., Wagatsuma K. Matrix effects of easily ionizable elements and nitric acid in highpower microwave-induced nitrogen plasma atomic emission spectrometry // *Spectrochim. Acta B.* 2002. V. 57. P. 1247.
 11. Башилов А., Рогова О. Атомно-эмиссионная спектроскопия микроволновой плазмы: новый метод элементного анализа // *Аналитика.* 2013. № 12. С. 48.
 12. Medvedev N.S., Shaverina A.V., Tsygankova A.R., Saprykin A.I. Comparison of analytical performances of inductively coupled plasma mass spectrometry and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for trace analysis of bismuth and bismuth oxide // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 142. P. 23.
 13. Лундовская О.В., Цыганкова А.Р., Петрова Н.И., Сапрыкин А.И. Анализ кадмия и его оксида методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // *Журн. аналит. химии.* 2018. Т. 73. № 9. С. 680. (Lundovskaya O.V., Tsygankova A.R., Petrova N.I., Saprykin A.I. Analysis of cadmium and cadmium oxide by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry // *J. Anal. Chem.* 2018. V. 73. P. 877.)
 14. Williams C.B., Jones B.T., Donati G.L. Naturally occurring molecular species used for plasma diagnostics and signal correction in microwave-induced plasma optical emission spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2018. V. 33. P. 1224.
 15. Silva A.B.S., Higuera J.M., Nogueira A.R.A. Internal standardization and plasma molecular species: signal correction approaches for determination of phosphorus from phospholipids in meat by MIP OES // *J. Anal. At. Spectrom.* 2019. V. 34. P. 782.
 16. Ozbek N., Akman S. Determination of boron in Turkish wines by microwave plasma atomic emission spectrometry // *Food Chem.* 2016. V. 192. P. 295.
 17. Foster W.H., Hume D.N. Mutual cation interference effects in flame photometry // *Anal. Chem.* 1959. V. 31. P. 2033.
 18. Хамдеев М.И., Васильева О.Н., Чистяков В.М., Ерин Е.А. Атомно-эмиссионный спектральный анализ фосфатных концентратов продуктов деления и примесей, получаемых в процессе регенерации облученного ядерного топлива // *Заводск. лаборатория. Диагностика материалов.* 2015. Т. 81. С. 65.
 19. Ахсанова О.Л., Загитов Р.М., Гатиятуллина Л.Я. Определение бора в алюмосиликатном катализаторе методом эмиссионного спектрального анализа // *Заводск. лаборатория. Диагностика материалов.* 2017. Т. 83. С. 26.
 20. Дробышев А.И., Савинов С.С. Дуговой атомно-эмиссионный спектрографический анализ жидких биопроб с использованием МАЭС // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2015. Т. 81. С. 142.
 21. Nelson J., Hopfer H., Gilleland G., Cuthbertson D., Boulton R., Ebeler S.E. Elemental profiling of Malbec wines under controlled conditions using microwave plasma-atomic emission spectroscopy // *Am. J. Enol. Vitic.* 2015. V. 66. P. 373.
 22. Karlsson S., Sjöberg V., Ogar A. Comparison of MPAES and ICP-MS for analysis of principal and selected trace elements in nitric acid digests of sunflower (*Helianthus annuus*) // *Talanta.* 2015. V. 135. P. 124.
 23. Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscopy (MP-AES) Application eHandbook/Agilent Tech. Inc. 2016. 5991-7282EN. *Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscopy (MP-AES) Application eHandbook (agilent.com)* (31.01.2022).
 24. Mermet J.M. Use of magnesium as a test element for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry diagnostics // *Anal. Chim. Acta.* 1991. V. 250. P. 85.
 25. Silva F.V., Trevizan L.C., Silva C.S., Nogueira A.R.A., Nóbrega J.A. Evaluation of inductively coupled plasma optical emission spectrometers with axially and radially viewed configurations // *Spectrochim. Acta B.* 2002. V. 57. P. 1905.
 26. Полякова Е.В., Номероцкая Ю.Н., Сапрыкин А.И. Влияние матричного элемента и кислоты на аналитические сигналы в атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой // *Журн. аналит. химии.* 2020. Т. 75. № 4. С. 333. (Polyakova E.V., Nomerotskaya Yu. N., Saprykin A.I. Effect of matrix element and acid on analytical signals in nitrogen microwave-plasma atomic emission spectrometry // *J. Anal. Chem.* 2020. V. 75. P. 474.)
 27. Водно-болотные угодья России: озерная система нижнего течения реки Баган. <http://www.fesk.ru/wetlands/21.html> (31.01.2022).