

Расширение диапазона определения элементов на атомно-абсорбционном спектрометре «Гранд-ААС» с использованием нескольких их линий поглощения

***С.С. Болдова^{1,2}, Н.А. Колосов^{1,2}, В.А. Лабусов^{1,2,3}**

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 1

²ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 1

³Новосибирский государственный технический университет,
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20

*Адрес для переписки: Болдова Светлана Сергеевна, E-mail: kurilko_svetlana@mail.ru

Поступила в редакцию 23 сентября 2021 г., после исправления – 20 октября 2021 г.

Одним из ограничений метода атомно-абсорбционной спектрометрии является узкий рабочий диапазон определяемых концентраций: 1-2 порядка. При одновременном многоэлементном анализе это может потребовать многократного разбавления образца для определения нескольких элементов с разной концентрацией в пробе. Возможными способами расширения диапазона определяемых концентраций являются линеаризация градуировочного графика путём коррекции интеграла сигнала поглощения или использование в качестве аналитического сигнала значений поглощения на крыле линии и построения нескольких графиков по одной линии на различном удалении от её центра. Оба способа имеют свои недостатки. Предложен еще один способ расширения диапазона определяемых концентраций путём использования менее чувствительные линии поглощения элементов. Определен ряд элементов, имеющих достаточное количество линий с разной чувствительностью. Проведено сравнение предложенного способа со способами линеаризации градуировочного графика и с вычислением сигнала поглощения на крыле линии. На примере Со и Ni, имеющих достаточно богатый спектр поглощения, показана возможность расширения диапазона определяемых концентраций до шести порядков для кобальта и пяти порядков для никеля с использованием нескольких линий поглощения. Градуировочные графики построены в диапазоне концентраций 0.24 – 250000 мкг/л для кобальта и 1.9 – 250000 мкг/л для никеля. Погрешность градуировки по сравнению с методом линеаризации снижена с 25 % до 5 % для кобальта и с 24 % до 4 % для никеля. Таким образом, предложенный способ позволит определять несколько элементов в большом диапазоне концентраций без разбавления образца.

Ключевые слова: атомно-абсорбционная спектрометрия, электротермический атомизатор, источник непрерывного спектра, одновременное определение элементов, спектрометр, многоканальный анализатор спектров, линейки фотодетекторов.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2021, vol. 25, no. 4, pp. 318-325

DOI: 10.15826/analitika.2021.25.4.010

Expanding the range of determination of elements on the Grand-AAS atomic absorption spectrometer using several of their absorption lines

***S.S. Boldova^{1, 2}, N.A. Kolosov^{1, 2}, and V.A. Labusov^{1, 2, 3}**

¹Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Koptyuga 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²VMK-Optoelektronika, pr. Akademika Koptyuga 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University, pr. K. Marksa 20, Novosibirsk,
630073, Russian Federation

*Corresponding author: Svetlana S. Boldova, E-mail: kurilsvet@gmail.com

Submitted 23 September 2021, received in revised form 20 October 2021

One limitation of atomic absorption spectrometry is the narrow range of measurable concentration (1–2 orders of magnitude). In simultaneous multi-element analysis, this may require multiple dilutions of the sample to determine several elements with different concentrations in the sample. Possible ways to expand the range are to linearize the calibration curve by correcting the integral of the absorption signal or to use absorption values on the line wing as an analytical signal and plot several graphs along one line at different distances from its center. Both methods have their drawbacks. We propose another method for expanding the measurable concentration range by using less sensitive absorption lines of elements. A number of elements are identified that have a sufficient number of lines with different sensitivities. The proposed method is compared with the method of linearization of the calibration graph and the calculation of the absorption signal on the line wing. Using as an example Co and Ni, which have sufficiently rich absorption spectra, we have shown the possibility of expanding the measurable concentration range by using several absorption lines: for cobalt, the range is expanded to six orders of magnitude, and for nickel, to five orders of magnitude. Calibration curves are plotted in the concentration ranges 0.24–250.000 µg/L for cobalt and 1.9–250.000 µg/L for nickel. The calibration error is lower than that of the linearization method: 5% against 25% for cobalt and 4% against 24% for nickel. Thus, the proposed method can be used for simultaneous multielement determination in a wide range of concentrations without diluting the sample.

Keywords: atomic absorption spectrometry, electrothermal atomizer, continuous spectrum source, simultaneous determination of elements, spectrometer, multichannel spectrum analyzer, linear photodetector arrays.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с электротермической атомизацией (ЭТА) стал методом одновременного многоэлементного анализа подобно методу атомно-эмиссионной спектроскопии. Это произошло благодаря созданию атомно-абсорбционного спектрометра высокого спектрального и временного разрешения «Гранд-ААС» с аналитическими характеристиками близкими современным одноэлементным спектрометрам [1, 2]. Спектрометр оснащен ярким источником излучения непрерывного спектра на основе лазерной плазмы в ксеноне, многоканальными анализаторами спектра МАЭС и электротермическим атомизатором с программируемым нагревом, что дает возможность одновременной регистрации всех аналитических линий поглощения элементов в спектральном диапазоне 190 – 855 нм. Высокая яркость, временная и пространственная стабильность лазерной плазмы позволяют получать низкие пределы обнаружения, близкие современным одноэлементным спектрометрам, а используемые при обработке данных математические методы [3, 4] дают возможность проводить анализ в широком диапазоне концентраций при однократном дозировании пробы.

В атомно-абсорбционном анализе обычно работают на линейном участке градуировочного графика, который составляет 1-2 порядка концентраций. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к переходу к корневой зависимости сигнала поглощения от концентрации. Для расширения диапазона определяемых концентраций было предложено несколько методов. Хейтман, Велц и др. предложили [5] вычисление сигнала поглощения по крыльям линии за счет регистрации ее профиля и построения

набора градуировочных графиков для пикселей слева и справа от центра линии. Однако этот метод не позволяет полностью линейаризовать график и для больших концентраций все же присутствует загиб графика [6].

Другой метод предложен Кацковым [4] и предполагает коррекцию поглощения как функцию:

$$S^*(t) = S(t) - 0.5 \times \{S(t) - [S(t) + C_1]^2 / 4C_1\} \times \{1 + \text{Sign}[S(t) - C_1]\}, \quad (1)$$

где C_1 – параметр, характеризующий для заданной линии максимальное соответствие градуировочного графика линейной регрессии, и $\text{Sign}[S(t) - C_1]$ функция, равная 1 или –1, в зависимости от знака аргумента. Такой метод позволяет аппроксимировать графики в логарифмических координатах уравнениями первого порядка $y = ax + b$, где коэффициент a приближается к теоретическому значению $a = 1$ с высокой точностью (коэффициент корреляции $R^2 > 0.99$). Этот метод реализован в программном обеспечении «Атом» спектрометра «Гранд-ААС».

Спектры поглощения, получаемые на спектрометре «Гранд-ААС», содержат десятки тысяч отсчетов по длине волны и визуально очень похожи на атомно-эмиссионные спектры, например, на получаемые с помощью анализаторов МАЭС [7]. В этих спектрах наряду с аналитическими (самыми чувствительными) линиями поглощения часто присутствуют менее чувствительные линии элемента, которые также, как в атомно-эмиссионном анализе, можно использовать для расширения диапазона определения этого элемента в область высоких концентраций.

Целью работы являлась проверка возможности использования менее чувствительных линий элемента для расширения диапазона его определения в область высоких концентраций. Определить

круг элементов, имеющих достаточное количество спектральных линий для этого. На примере двух из них продемонстрировать возможность расширения диапазона их определения указанным способом. Оценить погрешности определения для выбранных элементов и сравнить с погрешностями других методов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой спектрометр Гранд-ААС [1, 2] с расширенным спектральным диапазоном 190-855 нм и отдельными линейками на аналитические линии элементов в длинноволновом диапазоне (190-593, 656-690, 754-789, 829-855 нм). Разрешение в диапазоне 190-360 нм составляет 10 пм, а в диапазоне 350-855 нм – 30 пм. Атомизация пробы осуществляется электротермическим атомизатором продольного типа с программируемым нагревом.

Реактивы

В качестве градуировочных растворов использовали смесь одноэлементных стандартов Co (ГСО 7880-2001), Ni (ГСО 7873-2000). В качестве разбавителя применяли 1.5 % об. азотную кислоту. Градуировочные растворы готовили путем двукратного разбавления смеси стандартов в диапазоне 0.24 – 250000 мкг/л.

Процедура

Подробно процесс регистрации спектров и вычисления аналитического сигнала описан в [1, 2]. Дозирование образца проводилось автодозатором в объеме 20 мкл. Используемая температурная программа представлена в табл. 1. За 2 с регистрировалось 200 спектров поглощения. Вычисление аналитического сигнала поглощения осуществлялось интегрированием линии по длине волны и времени [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В базах данных обычно указано 1-2, максимум три спектральные линии для каждого элемента. Однако для ряда элементов их существенно больше. По книге Welz [6] была составлена база спектральных линий «Поглощение» [8] по каждому элементу с соответствующими им чувствительностями. В табл. 2 приведены элементы, количество линий в базе для каждого из них и диапазон чувствительностей.

Как минимум по 18 элементам можно проводить градуировку с использованием нескольких линий элемента. Однако для этого нужно чтобы у элемента был набор линий с широким диапазоном чувствительностей, что бывает не у всех элементов. Например, у лития есть очень чувствительная линия 670.776 нм, а ближайшая к ней по чувствительности

Таблица 1

Температурная программа

Table 1

Temperature program

Шаг	Время, с	Температура, °С	Газ, л/мин
Сушка	60	90	1
Пиролиз	30	500	1
Атомизация	2	2400	0
Очистка	1	2500	1

линия 323.26 нм в 40 раз слабее. В этом случае невозможно построить графики, перекрывающие широкий диапазон концентраций. Надо заметить, что в действительности линий у многих элементов гораздо больше. На рис. 1 приведен фрагмент спектра поглощения кобальта с линиями из базы «Поглощение» (рис. 1, а) и эмиссионной базы «Дуга» (рис. 1, б) программы «Атом» [7]. Видно, что в указанном диапазоне гораздо больше спектральных линий, принадлежащих кобальту, чем указано в базе «Поглощение». К сожалению, для уточнения базы на данный момент у нас не имеется достаточно чистых одноэлементных стандартов. Стандарт кобальта, для которого зарегистрированы эти спектры, имеет загрязнения по железу, кремнию, магнию и

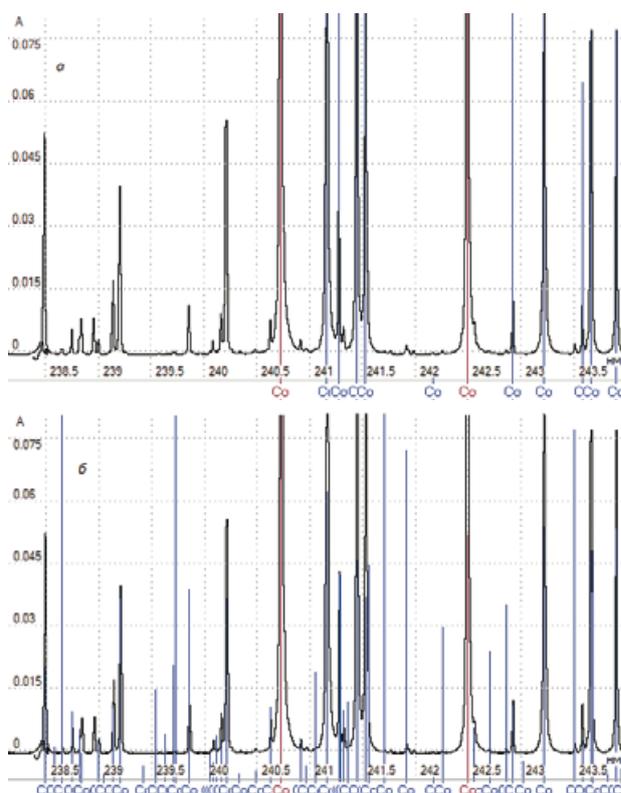


Рис. 1. Фрагмент спектра поглощения кобальта с линиями из базы «Поглощение» (а) и эмиссионной базы «Дуга» (б) программы «Атом».

Fig. 1. Fragment of the absorption spectrum of cobalt with lines from the Absorption database (a) and the Duga emission database (b) from the Atom program.

Таблица 2

Количество спектральных линий поглощения и диапазон их чувствительностей в отн. ед. [6], где 10000 — самая чувствительная линия поглощения.

Table 2

Number of absorption spectral lines and their sensitivity range in rel. unit [6], 10 000 – the most strong line.

Элемент	Количество линий	Диапазон чувствительностей, отн. ед.	Элемент	Количество линий	Диапазон чувствительностей, отн. ед.
Ag	3	67-10000	Nb	1	-
Al	29	18-10000	Nd	1	-
As	2	3000-10000	Ni	70	0.56-10000
Au	1	-	Os	1	-
B	1	-	P	1	-
Ba	6	0.6-10000	Pb	10	0.25-10000
Be	1	-	Pd	16	12-10000
Bi	6	556-10000	Pr	1	-
Ca	4	-	Pt	1	-
Cd	2	-	Rb	1	-
Co	92	0.5-10000	Re	1	-
Cr	27	0.42-10000	Rh	1	-
Cs	1	-	Ru	1	-
Cu	11	10-10000	Sb	1	-
Dy	1	-	Sc	1	-
Er	1	-	Se	2	2500-10000
Eu	1	-	Si	12	400-10000
Fe	72	0.12-10000	Sm	1	-
Ga	15	12-10000	Sn	19	59-10000
Gd	1	-	Sr	6	36-10000
Ge	19	38-10000	Ta	1	-
Hf	1	-	Tb	1	-
Hg	1	-	Te	2	2500-10000
Ho	1	-	Ti	98	15-10000
In	14	10-10000	Tl	6	33-10000
Ir	1	-	Tm	1	-
K	4	24-10000	U	1	-
Li	3	17-10000	V	121	6-10000
Lu	1	-	W	1	-
Mg	2	435-10000	Y	1	-
Mn	18	0.03-10000	Yb	1	-
Mo	15	11-10000	Zn	1	-
Na	5	0.01-10000	Zr	1	-

Примечание: «-» – не определяли.

Таблица 3

Данные уравнений линейной регрессии для градуировочных графиков кобальта из рис. 2

Table 3

Data of linear regression equations for the cobalt calibration curves from Fig. 2

Номер графика	Линия, нм	a	b	R^2
1	240.72 линеаризация по (1)	0.974	-2.64	0.999
2	240.72	1.023	-2.62	0.9996
3	240.72 левое крыло (11-й диод от центра линии)	0.935	-5.85	0.9997
4	243.22	0.988	-3.21	0.9993
5	243.9	0.932	-3.79	0.9992
6	235.54	0.981	-4.78	0.999
7	255.5	0.986	-5.58	0.9977
8	260.09	1.034	-6.48	0.9993
9	259.52	1.015	-7.07	0.9983

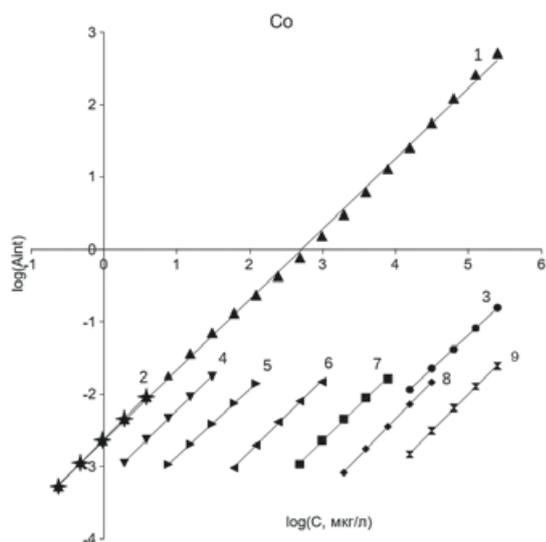


Рис. 2. Градуировочные графики, построенные по линиям кобальта: 1 – 240.72 нм, линейризованный по формуле (1) с коэффициентом $C_1 = 0.06$, 2 – 240.72 нм в линейном участке, 3 – 240.72 нм крыло линии, 4 – 243.22 нм, 5 – 243.9 нм, 6 – 235.54 нм, 7 – 255.5 нм, 8 – 260.09 нм, 9 – 359.52 нм.

Fig. 2. Calibration plots constructed from cobalt lines: 1 – 240.72 nm, linearized according to formula (1) with coefficient $C_1 = 0.06$, 2 – 240.72 nm in the linear section, 3 – 240.72 nm line wing, 4 – 243.22 nm, 5 – 243.9 nm, 6 – 235.54 nm, 7 – 255.5 nm, 8 – 260.09 nm, 9 – 359.52 nm.

ряду других элементов. У группы редкоземельных элементов в [6] не указаны альтернативные линии, хотя спектр у них достаточно богатый.

Возможность расширения диапазона определения элементов в область высоких концентраций с использованием их менее чувствительных линий продемонстрируем на примере кобальта и никеля.

Кобальт

Ввиду большого числа линий кобальта в широком диапазоне чувствительностей для них был построен ряд градуировочных графиков (рис. 2). График 3 построен по крылу линии поглощения 240.72 нм (рис. 3). Из рис. 2 видно, что менее чувствительные линии кобальта перекрывают весь диапазон градуировочного графика, а некоторые пересекаются друг с другом. Таким образом одну и ту же концентрацию можно вычислять по двум спектральным линиям.

В табл. 3 приведены коэффициенты для уравнения линейной регрессии $\log(A_{int}) = a \cdot \log(C) + b$ и коэффициент корреляции для линий кобальта. График 1, построенный по формуле (1), имеет коэффициент a немного ниже единицы, но близкий к ней. График же, построенный без линейризации по линейному участку графика дает угол чуть больше 45 градусов. Графики, построенные по менее чувствительным

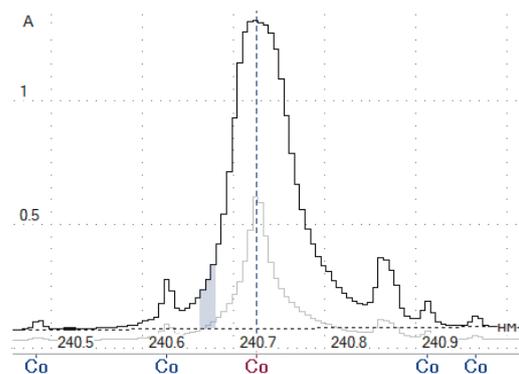


Рис. 3. Вычисление сигнала на крыле линии кобальта 240.7 нм.

Fig. 3. Calculation of the signal on the wing of the 240.7 nm cobalt line.

линиям, имеют угол как больше 45 градусов, так и меньше.

В табл. 4 приведены отклонения вычисленных по этим графиками концентраций C_f от введенных C_{in} , а также ОСКО сигналов поглощения по пяти параллельным измерениям для каждой концентрации. Видно, что для графиков, построенных в узком линейном диапазоне точность градуировки существенно выше. Если по линейризованному графику отклонение достигает 25 %, то по менее чувствительным линиям составляет не более 5 %. График, построенный по крылу основной линии ко-

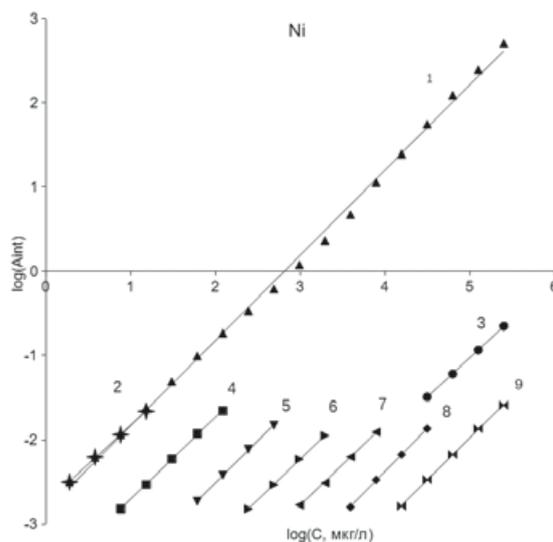


Рис. 4. Градуировочные графики, построенные по линиям никеля: 1 – 232.0 нм линейризованный по формуле (1) с коэффициентом $C_1 = 0.04$, 2 – 232.0 нм в линейном участке, 3 – 232.0 нм крыло линии, 4 – 232.71 нм, 5 – 232.19 нм, 6 – 236.06 нм, 7 – 239.63 нм, 8 – 312.93.0 нм, 9 – 316.55 нм.

Fig. 4. Calibration plots constructed from nickel lines: 1 – 232.0 nm, linearized according to formula (1) with coefficient $C_1 = 0.04$, 2 – 232.0 nm in the linear section, 3 – 232.0 nm line wing, 4 – 232.71 nm, 5 – 232.19 nm, 6 – 236.06 nm, 7 – 239.63 nm, 8 – 312.93.0 nm, 9 – 316.55 nm.

Таблица 4

Относительные отклонения введенной и вычисленной концентрации для линий кобальта $(C_{in} - C_r) / C_{in}$, %

Table 4

Relative deviations of the introduced and calculated concentration for cobalt lines $(C_{in} - C_r) / C_{in}$, %

C, мкг/л	ОСКО A_{in} , %	Линия, нм								
		240.72 по (1) $C_1 =$ 0.06	240.72	243.22	243.9	235.54	255.5	260.09	259.52	240.72 крыло линии
0.24	3.4	6.05	2.27	-	-	-	-	-	-	-
0.48	3.3	-1.5	-1.08	-	-	-	-	-	-	-
0.95	2.4	-6.95	-2.87	-	-	-	-	-	-	-
1.9	2.1	-7.48	0.39	3.53	-	-	-	-	-	-
3.8	0.74	-10.1	1.43	-3.02	-	-	-	-	-	-
7.6	2.3	-8.79	-	-2.5	-0.01	-	-	-	-	-
15.3	1.2	-12.07	-	-1.58	0.39	-	-	-	-	-
30.5	1.7	-10.76	-	3.01	0.39	-	-	-	-	-
61	1	-5.02	-	-	-1.09	3.66	-	-	-	-
122.1	1.7	4.97	-	-	0.88	-0.76	-	-	-	-
244.1	1.6	11.94	-	-	-	-5.68	-	-	-	-
488.3	0.56	18.9	-	-	-	-2.4	4.97	-	-	-
976.6	1.2	18.28	-	-	-	4.56	-3.42	-	-	-
1953.1	1.5	17.57	-	-	-	-	-3.94	2.21	-	-
3906.3	0.78	13.73	-	-	-	-	-2.91	-2.4	-	-
7812.5	0.49	9.76	-	-	-	-	4.9	-0.61	-	-
15625	2	8.48	-	-	-	-	-	0.16	2.72	0.16
31250	5	-1.76	-	-	-	-	-	1.12	-1.12	-2.08
62500	2	-13.92	-	-	-	-	-	-	-3.04	2.56
125000	1.2	-23.2	-	-	-	-	-	-	-2.4	-0.8
250000	1.6	-24.4	-	-	-	-	-	-	3.2	-0.4

Примечание: «-» – вне диапазона градуировочного графика.

бальта 240.72 нм, имеет угол близкий к 45 градусам в диапазоне концентраций 15625 – 250000 мкг/л.

грешности определения приведены на рис. 4, в табл. 5 и 6. Из табл. 6 видно, что также, как и для кобальта, для менее чувствительных линий никеля градуировочные графики построены с меньшей погрешностью и она составляет не более 4 % в сравнении с линеаризованным по формуле (1), где максимальное отклонение составило 24 %.

Никель

Градуировочные графики для линий Ni, данные уравнений линейной регрессии для них и по-

Таблица 5

Данные уравнений линейной регрессии для градуировочных графиков никеля из рис. 5

Table 5

Data of linear regression equations for the calibration curves of nickel from Fig. 5

Номер графика	Линия, нм	a	b	R ²
1	232.00 линеаризация по (1)	1.012	-2.85	0.9982
2	232.00	0.9245	-2.75	0.9996
3	232.00 левое крыло (9-й диод от центра линии)	0.93	-5.67	0.9999
4	231.71	0.976	-3.68	0.9997
5	232.19	1.0015	-4.52	0.9994
6	236.06	0.968	-5.13	0.9998
7	239.63	0.964	-5.66	0.9989
8	312.93	1.025	-6.47	0.9997
9	316.55	0.9955	-6.95	0.9995

Таблица 6

Относительные отклонения введенной и вычисленной концентрации для линий никеля $(C_{in}-C_i)/C_{in}$, %

Table 6

Relative deviations of the introduced and calculated concentration for nickel lines $(C_{in}-C_i)/C_{in}$, %

C, мкг/л	ОСКО A_{int} , %	Линия, нм								
		232.0 по (1) $C_1 = 0.04$	232.0	231.71	232.19	236.06	239.63	312.93	316.55	232.0 крыло линии
1.91	3.3	-15.34	1.43	-	-	-	-	-	-	-
3.81	1.7	-12.46	-2.50	-	-	-	-	-	-	-
7.63	0.84	-4.33	0.65	-0.27	-	-	-	-	-	-
15.26	2.3	-7.48	0.39	1.70	-	-	-	-	-	-
30.52	2.2	-8.46	-	-0.27	-	-	-	-	-	-
61.04	1.2	-7.15	-	-2.73	1.70	-	-	-	-	-
122.07	1.1	0.06	-	1.70	-1.58	-	-	-	-	-
244.14	0.85	8.25	-	-	-2.40	0.06	-	-	-	-
488.28	2.4	18.08	-	-	1.90	1.08	-	-	-	-
976.56	0.99	21.36	-	-	-	-1.89	-2.40	-	-	-
1953.13	1.2	23.71	-	-	-	0.67	3.74	-	-	-
3906.25	0.92	23.71	-	-	-	-	-0.10	1.44	-	-
7812.5	0.44	9.12	-	-	-	-	-1.25	-2.02	-	-
15625	1.1	1.44	-	-	-	-	-	0.16	2.08	-
31250	0.93	-9.76	-	-	-	-	-	0.48	-1.76	-0.48
62500	1	-20.48	-	-	-	-	-	-	-0.64	0.32
125000	1	-20.00	-	-	-	-	-	-	-2.40	0.80
250000	2.6	-21.60	-	-	-	-	-	-	2.40	-0.40

Примечание: «-» – вне диапазона градуировочного графика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможности использования менее чувствительных линий элемента для расширения диапазона его определения в область высоких концентраций. По базе данных спектральных линий определено, что достаточное количество линий и диапазон чувствительностей имеют, по крайней мере 18, элементов. На примере Co и Ni показано, что градуировочные графики, построенные по менее чувствительным линиям поглощения, имеют существенно меньшую погрешность, чем графики с использованием коэффициентов линеаризации, которая не превышает 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабусов В.А., Болдова С.С., Селюнин Д.О., Скоробогатов Д.Н., Саушкин М.С., Зарубин И.А., Бок Д.Н., Семёнов З.В., Неклюдов О.А., Ващенко П.В. Атомно-абсорбционный спектрометр высокого разрешения для одновременного многоэлементного анализа // Аналитика и контроль. 2018. Т. 22, № 4. С. 451-457.
2. Labusov V.A., Boldova S.S., Selyunin D.O., Semenov Z.V., Vashchenko P.V., Babin S.A. High-resolution continuum-source electrothermal atomic absorption spectrometer for simultaneous multi-element determination in the spectral range of 190–780 nm // J. Anal. At. Spectrom. 2019. V. 34, P. 1005-1010.
3. Семёнов З.В., Ващенко П.В., Лабусов В.А., Неклюдов О.А., Болдова С.С. Алгоритм расчёта формы фона в последовательности атомно-абсорбционных спектров с непрерывным источником излучения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-II. С. 129-132.
4. Katskov D., Hlongwane M., Heitmann U., Florek S. High-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry: Linearization of the calibration curves with a broad concentration range // Spectrochim. Acta. Part B. 2012. V. 71–72, P. 14–23.
5. Heitmann U., Welz B., Borges D.L.G., Lepri F.G. Feasibility of peak volume, side pixel and multiple peak registration in high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry // Spectrochim. Acta, Part B. 2007. V. 62, № 11, P. 1222–1230.
6. Welz B., Becker-Ross H., Florek S. and Heitmann U. High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, 295 p.
7. Гаранин В.Г., Неклюдов О.А., Петроченко Д.В., Семёнов З.В., Панкратов С.В., Ващенко П.В. Программное обеспечение атомного спектрального анализа «Атом» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-2. С. 103-111.
8. Колосов Н.А., Болдова С.С. База данных спектральных линий для атомно-абсорбционного спектрального анализа с непрерывным источником спектра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, «СибОптика-2018», Новосибирск, 23-24 апреля 2018. Т. 5, №2. С. 202-210.

REFERENCES

1. Labusov V.A., Boldova S.S., Selunin D.O., Semenov Z.V., Vashchenko P. and Babin S.A. [High-resolution atomic absorption spectrometer for the simultaneous multielement analysis]. *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 451-457 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2018.22.4.003
2. Labusov V.A., Boldova S.S., Selyunin D.O., Semenov Z.V., Vashchenko P.V., Babin S.A. High-resolution continuum-source electrothermal atomic absorption spectrometer for simultaneous multi-element determination in the spectral range of 190–780 nm. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2019, vol. 34, pp. 1005-1010. <https://doi.org/10.1039/c8ja00432c>.
3. Semenov Z.V., Vaschenko P.V., Labusov V.A., Neklyudov O.A., Boldova S.S. [Algorithm of Background Shape Calculation in a Sequence of Atomic-Absorption Spectra with a Continuous Radiation Source]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*. 2017, vol. 83, no. 1, pp. 129-132 (in Russian).
4. Katskov D., Hlongwane M., Heitmann U., Florek S. High-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry: Linearization of the calibration curves within a broad concentration range. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2012, vol. 71–72, pp. 14–23. doi: 10.1016/sab.2012.03.007.
5. Heitmann U., Welz B., Borges D.L.G., Lepri F.G. Feasibility of peak volume, side pixel and multiple peak registration in high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2007, vol. 62, no. 11, pp. 1222–1230. doi: 10.1016/j.sab.2007.10.011.
6. Welz B., Becker-Ross H., Florek S. and Heitmann U. *High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, 295 p.
7. Garanin V.G., Neklyudov O.A., Petrochenko D.V., Semenov Z.V., Pankratov S.V., Vashchenko P.V. [«Atom» software for atomic spectral analysis]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*. 2019, vol. 85, no. 1, pp. 103-111 (in Russian). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111>
8. Kolosov N.A., Boldova S.S. [Database of spectral lines for atomic-absorption spectral analysis with continuous spectrum source]. *Interekhpo GEO-Sibir', SibOptika-2018, Novosibirsk, April 23-24, 2018 [Interexpo GEO-Siberia, SibOptics-2018, Novosibirsk, April 23-24, 2018]*, vol. 5, no. 2, pp. 202-210 (in Russian).]