

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-12-18>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЕБРА В ВЫСОКОЧИСТЫХ РАСТВОРАХ МЕДИ И НИКЕЛЯ МЕТОДОМ ЭТААС ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ИСТОЧНИКОМ СПЛОШНОГО СПЕКТРА

© Михаил Юрьевич Бурьлин, Елена Сергеевна Копейко*,
Елена Сергеевна Костюченко

Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149;

*e-mail: kopeikoelena@yandex.ru

*Статья поступила 30 июня 2023 г. Поступила после доработки 25 июля 2023 г.
Принята к публикации 24 августа 2023 г.*

Определение серебра в меди, никеле и сплавах на их основе регламентировано нормативными документами на ряд продукции цветной металлургии. Разработаны условия определения Ag в меди и никеле методом электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии высокого разрешения с источником непрерывного спектра на уровне 10^{-6} – 10^{-5} %. По результатам атомно-абсорбционного определения серебра в растворах Cu и Ni с концентрацией 10 г/л каждого найдены оптимальные температурные режимы программы атомизатора и количество вводимой никелевой основы в стандартные растворы серебра. Для построения градуировочных зависимостей использованы водные стандартные растворы аналита (определение в меди) и водные стандартные растворы аналита с добавкой 10 мг/л нитрата никеля (определение в никеле). Выбранная температура атомизации составила 1600 °C, объем дозирования растворов в графитовую печь — всегда 20 мкл. При определении серебра в высокочистой меди использовали различные температуры стадии пиролиза для измерений с дозированием стандартных растворов аналита — 600 °C, с дозированием анализируемого раствора меди — 800 °C. При определении серебра в растворах никеля температура стадии пиролиза составляла 800 °C. Разработанные условия определения серебра апробированы при анализе высокочистых образцов меди и никеля (стандартные растворы Inorganic Ventures (США) с концентрацией 10 г/л) методом «введено – найдено». Максимальное значение относительной погрешности определений не превышает 13 %. Пределы обнаружения серебра составили: $1,8 \cdot 10^{-6}$ % в меди и $3,2 \cdot 10^{-6}$ % в никеле.

Ключевые слова: серебро; медь; никель; высокочистые материалы; электротермическая атомно-абсорбционная спектроскопия высокого разрешения; источник сплошного спектра.

DETERMINATION OF Ag IN HIGH-PURITY SOLUTIONS OF COPPER AND NICKEL BY HIGH-RESOLUTION CONTINUUM-SOURCE ELECTROTHERMAL ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY (HR-CS-ETAAS)

© Mikhail Yu. Burylin, Elena S. Kopeiko*, Elena S. Kostyuchenko

Kuban State University, 149, Stavropol'skaya ul., Krasnodar, 350040, Russia; *e-mail: kopeikoelena@yandex.ru

Received June 30, 2023. Revised July 25, 2023. Accepted August 24, 2023.

A need to control the silver content in high-purity copper and nickel samples is attributed to the deterioration of the technical characteristics of materials when the presence of such impurities exceeds the permissible levels. In this study, modes for the determination of Ag in copper and nickel by high-resolution electrothermal atomic absorption spectrometry with a continuum source at a content of 10^{-6} – 10^{-5} % have been developed. The optimal temperature regimes of the atomizer program and the amount of chemical modifier introduced were developed proceeding from the results of studying the regularities of atomic absorption measurements of silver in matrix solutions of Cu and Ni (with a concentration of 10 g/liter each). To construct calibration dependences, aqueous standard solutions of the analyte (determination in copper) and aqueous standard solutions of the analyte with the addition of nickel nitrate 10 mg/liter (determination in nickel) were used. The atomization temperature was chosen to be 1600°C. The dosing volume of the solutions in the graphite furnace was always 20 µl. When determining Ag in high-purity copper, different temperatures of the pyrolysis stage were used for measurements with dosing of standard analyte solutions (600°C) and for measurements with dosing of the analyzed copper solution (800°C). In the determination of silver in nickel solutions, the temperature of the pyrolysis stage was 800°C. The developed conditions for the determination of silver were tested in the analysis of high-purity samples of copper and nickel (standard solutions of Inorganic Ventures, USA with a concentration of 10 g/liter) using spiked tests. The

maximum value of the relative error of determinations does not exceed 13%. The detection limits for silver were: $1.8 \times 10^{-6} \%$ in copper and $3.2 \times 10^{-6} \%$ in nickel.

Keywords: silver; copper; nickel; high-purity materials; high-resolution electrothermal atomic absorption spectrometry; continuous source.

Введение

Необходимость контроля серебра в меди, никеле и сплавах на их основе регламентирована рядом документов^{1,2}. Превышение норм содержания серебра ухудшает технические характеристики получаемых материалов, такие как электропроводность, коррозионная стойкость и прочность [1, 2]. Широко применяемыми на сегодняшний день методами контроля примесей в металлах и сплавах являются атомно-эмиссионная (АЭС) и масс-спектрометрия (МС) с индуктивно-связанной плазмой (ИСП), а также электротермическая атомно-абсорбционная спектрометрия (ЭТААС) с графитовой печью [3]. Для учета влияния матрицы в методиках с использованием АЭС [4] и МС [5] используют стандартные образцы состава сплавов, а для ЭТААС определения³ предусмотрено вводить в градуировочные растворы элементы основы в количествах, соответствующих содержанию в анализируемых пробах или использовать стандартные образцы состава сплавов. Такой подход имеет ряд недостатков: дополнительный расход высокочистых реактивов; высокие требования к их чистоте, уменьшение рабочего ресурса графитовой трубки за счет разрушения графита большими массами металлической матрицы, вносимой при каждом измерении (порядка 100 мкг). Кроме этого, известен прием предварительного отделения легколетучей матрицы от тугоплавких аналитов, как, например, это было сделано при определении в триоксиде молибдена свыше 30 примесных элементов [6]. Другой подход предполагает использование двухстадийной зондовой атомизации, что позволяет отогнать неконденсирующиеся газообразные продукты разложения органических (молочные продукты) [7] и неорганических (горные породы и руды) проб [8]. К сожалению, применить данные способы не представляется возможным, так как рассматриваемый в настоящей работе аналит (Ag) не является легколетучим по

отношению к матричным элементам Cu и Ni. Кроме того, с большой вероятностью следует ожидать конденсацию металлической матрицы на вольфрамовом зонде.

При использовании метода АЭС с дугой постоянного тока диапазон определяемых содержаний серебра в никелевых сплавах составляет от 0,00001 до 0,001 %, при этом допустимая погрешность анализа может составлять порядка 30 %⁴. Для метода ИСП-МС установленный диапазон определяемых содержаний аналита в тех же сплавах — 0,00001 – 0,00035 % с допустимой погрешностью на уровне 20 %⁵.

Метод атомно-абсорбционной спектрометрии широко используют в лабораториях, занимающихся испытаниями продукции цветной и черной металлургии. Он позволяет определять Ag, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Se, Sn, Te и Tl на уровне содержаний от $1 \cdot 10^{-5} \%$ и выше³, однако также включает в себя необходимость применения градуировочных растворов с добавлением высококонцентрированной матрицы (никель). Известно применение метода ЭТААС для прямого анализа твердых проб (solid-sampling) сульфидной руды, почвы, полимерного и биологического материалов [9]. Вместо термостабилизации серебра палладиевым химическим модификатором предложено понизить температуру атомизации. Это позволило провести атомизацию Ag отдельно от труднолетучей металлической матрицы на основе меди и никеля (сульфидная руда). В качестве химического модификатора использована 1,4 М азотная кислота (10 мкл на дозируемую пробу). Градуировка построена по стандартным растворам аналитов с дозированием на платформу для твердых проб. Минимально определяемое содержание серебра в сульфидной руде составило примерно $10^{-6} \%$.

В целях усовершенствования метода атомно-абсорбционной спектрометрии были разработаны спектрометры высокого разрешения с источником непрерывного спектра, которые оснащены наиболее эффективной системой коррекции неselectивного поглощения. При этом исключена необходимость применения дополнительного источника света, а также возможна одновременная

¹ ГОСТ 859–2014. Медь. Марки: нац. стандарт Рос. Федерации: Дата введения 2015-06-01. — М.: Стандартинформ, 2015. С. 1 – 7.

² ГОСТ 849–2018. Никель первичный. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2018. С. 1 – 11.

³ ГОСТ Р ИСО 7523–2016. Никель. Определение содержания серебра, мышьяка, висмута, кадмия, свинца, сурьмы, селена, олова, теллура и таллия. Спектрометрический метод атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией. — М.: Стандартинформ, 2016. — 15 с.

⁴ ГОСТ 6012–98. Никель. Методы химико-атомно-эмиссионного анализа. — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 20 с.

⁵ ASTM E2823–17. Standard Test Method for Analysis of Nickel Alloys by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. USA, 2017. P. 1 – 8.

регистрация аналитического сигнала атомного поглощения и фона. Регистрация сигналов осуществляется твердотельными полупроводниковыми детекторами с разрешением порядка 2 пм, что добавляет третью координату к аналитическому сигналу при электротермической атомизации (длина волны) и позволяет получить более детальную информацию о природе фона. Отмечено также снижение пределов обнаружения за счет улучшения соотношения сигнал/шум [10, 11]. Немаловажной является конструкция используемого электротермического атомизатора [12] — боковое относительно графитовой трубки расположение нагревательных электродов.

Опубликована работа о применении спектрометров высокого разрешения для определения Al в образцах железа [13], в которой влияние матрицы удалось устранить за счет регистрации только центрального пикселя на менее чувствительной линии алюминия. В работе [14] золото в геологических образцах определяли с предварительным концентрированием на углеродных нанотрубках. При определении Cd в угле использовали иридиевый перманентный химический модификатор [15]. Авторы работы [16] применили технику дозирования твердых проб для анализа геологических объектов методом ЭТААС высокого разрешения. Из-за фонового поглощения с ярко выраженной тонкой структурой спектра, обусловленной содержанием молекул серы, градуировочные графики построены с использованием стандартных образцов руд. Предел обнаружения серебра в данной работе составил $2 \cdot 10^{-7} \%$.

Проведенные нами исследования [17] подтвердили подавляющее влияние металлических матриц Cu и Ni при измерении атомной абсорбции As, Bi, Pb, Sb и Sn с электротермической атомизацией. Это особенно заметно при избытке массы матричных элементов по сравнению с массами аналитов, начиная от 10^4 и более. При оптимизированных условиях измерений оказалось возможным определить аналиты в медной и никелевой матрицах на уровне $n \cdot 10^{-5} \%$ методом ЭТААС высокого разрешения с источником непрерывного спектра. Градуировочные зависимости построены с использованием стандартных растворов определяемых элементов. Для ЭТААС низкого разрешения с линейчатыми источниками излучения этот показатель оказался на порядок хуже.

Цель настоящего исследования — разработать условия определения серебра в растворах высокочистых образцов меди и никеля с концентрацией каждого матричного элемента 10 г/л методом ЭТААС высокого разрешения с источником непрерывного спектра.

Экспериментальная часть

В работе использован атомно-абсорбционный спектрометр высокого разрешения с источником сплошного спектра ContraAA800 с электротермическим атомизатором поперечного нагрева, автодозатором AS-GF и графитовыми трубками с пиролитическим покрытием. Источником излучения служила ксеноновая лампа высокого давления (все Analytic Jena, Германия). Использована наиболее чувствительная линия Ag 328,068 нм. При этом линии атомного поглощения матричных элементов Cu и Ni не совпадают с аналитическими линиями определяемого элемента: так, линии поглощения меди (нм/отн. чувств., %) — 324,754/100; 327,396/45; 217,894/18; 216,509/13; 222,570/5; 249,215/1; 224,426/0,4; 244,161/0,3; линии поглощения никеля — 232,003/100; 231,096/59; 341,477/21; 352,454/19; 305,082/13; 351,505/8; 346,165/5; 303,793/5; 336,356/4; 323,293/2; 294,361/1,5. Регистрацию аналитических сигналов проводили с помощью набора пикселей $CP \pm 2$ (CP — центральный пиксель). Данный параметр был выбран в соответствии с рекомендациями [10, 18] и по результатам собственных исследований [19] как показавший наилучшую чувствительность определения и наибольшие линейные диапазоны градуировочных графиков при данной комбинации регистрирующих полупроводниковых детекторов. Во всех случаях измеряли интегральную абсорбцию.

Режимы нагрева графитовой печи представлены в табл. 1. Дозируемый объем растворов в графитовую печь составил 20 мкл. В качестве защитного газа использовали аргон повышенной чистоты (объемная доля аргона — не менее 99,99 %).

Рабочий раствор Ag готовили разбавлением стандартных растворов Ag (1 г/л) (Inorganic Ventures, США) бидистиллированной водой в день их использования. Поскольку приготовление растворов из высокочистых металлов требует специальных условий (чистая комната, высокочистые кислоты для растворения и т.д.), в работе использованы готовые «матричные растворы» Cu и Ni — стандартные растворы меди и никеля с концентрациями 10 г/л каждого (Inorganic Ventures, США). Чистота используемых металлов Cu и Ni для приготовления растворов, указанная производителем, составляет не менее 99,9996 %, а содержание Ag в растворах — не более 2 мкг/л.

Методика исследований. Для оптимизации режима нагрева графитовой печи при определении серебра использовали метод построения кривых пиролиза и атомизации с дозированием стандартного раствора серебра с концентрацией 2 мкг/л и матричных растворов Cu и Ni с концентрацией 10 г/л и добавкой серебра 2 мкг/л.

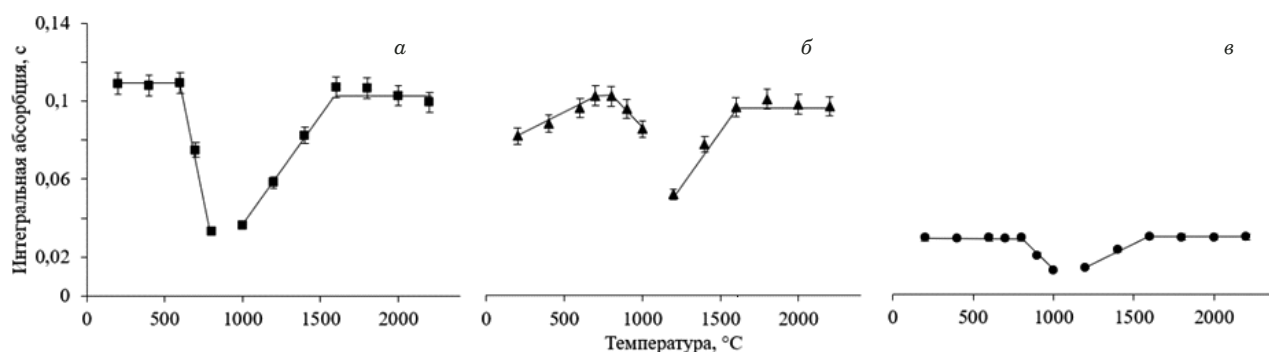


Рис. 1. Зависимость интегральной абсорбции серебра от температур стадий пиролиза и атомизации: *a* — стандартный раствор Ag 2 мкг/л; *b* — матрица Cu 10 г/л с добавкой Ag 2 мкг/л; *c* — матрица Ni 10 г/л с добавкой Ag 2 мкг/л

Fig. 1. Dependence of the atomic absorption of silver on the temperatures of the pyrolysis and atomization stages: *a* — standard solution, *b* — matrix Cu 10 g/liter with addition of Ag 2 µg/liter; *c* — Ni matrix 10 g/liter with addition of Ag 2 µg/liter

Далее по результатам измерений абсорбции при дозировании только матричных растворов Cu и Ni обоснованы температуры пиролиза и атомизации, обеспечивающие минимальное влияние фонового сигнала и регистрацию нулевых значений абсорбции серебра.

Затем проведено измерение абсорбции Ag с дозированием его стандартных растворов (0,25 мкг/л) и матричных растворов Cu и Ni с аналогичными добавками Ag. Применен критерий оптимизации режимов программы атомизатора — совпадение значений абсорбции при дозировании стандартных растворов и растворов на основе металлической матрицы. Для выполнения такого критерия допустили применение разных температурных режимов на стадиях программы атомизатора при измерении абсорбции Ag в градуировочных растворах и в растворах проб металлов, как это было сделано ранее [19].

Для обоснования способа построения градуировочных зависимостей сопоставили значения коэффициентов регрессии, полученные по результатам анализа серий стандартных растворов и по добавкам серебра к матричным растворам Cu и Ni.

Апробация оптимизированных условий ЭТААС-определения Ag проведена с использованием стандартных растворов на основе меди и никеля (10 г/л каждого) методом «введено — найдено». Такая концентрация растворов металли-

ческой основы соответствует составу анализируемого раствора после подготовки пробы по методике³.

Обсуждение результатов

Кривые пиролиза и атомизации (рис. 1, *a*), построенные по результатам измерения абсорбции серебра с дозированием стандартного раствора элемента (2 мкг/л), показали: максимально допустимая температура стадии пиролиза составила 600 °C, а оптимальная температура атомизации — 1600 °C. В присутствии 10 г/л меди максимально допустимая температура стадии пиролиза повысилась до 800 °C, а диапазон оптимальных температур атомизации не изменился (см. рис. 1, *b*). Чувствительность атомно-абсорбционного определения также не изменилась. Значения характеристических масс серебра составили 2,1 и 1,9 пг для стандартного раствора аналита и для матричного раствора меди с добавкой серебра соответственно. Результаты измерения аналитического сигнала серебра с дозированием матричного раствора Cu показали нулевые значения. Наложения посторонних линий и полос поглощения во всем исследуемом диапазоне не наблюдается (рис. 2, *a*). Таким образом, для устранения влияния матрицы меди при определении Ag методом ЭТААС достаточно задавать различные температуры стадий пиролиза при дозировании стандартного раствора (600 °C) и

Таблица 1. Программа электротермического атомизатора

Table 1. Electrothermal atomizer program

Стадия	Время, с	Температура, °C	Скорость нагрева, °C/с	Скорость защитного газа, л/мин
Сушка	30	105	5	max
Пиролиз	22	Оптимизированы	100	max
Атомизация*	5	Оптимизированы	1500	stop
Очистка	4	2700	500	max

* Измерение аналитического сигнала: интегральная абсорбция.

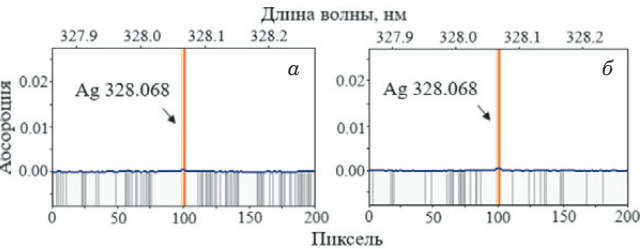


Рис. 2. Аналитические сигналы Ag при дозировании медной (а) и никелевой (б) матриц (10 г/л каждой); $t_{\text{пир}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{атм}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2. Analytical signals of Ag during dosing of copper (а) and nickel (б) matrices (10 g/liter each); $t_{\text{pyr}} = 800^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{atm}} = 1600^{\circ}\text{C}$

анализируемого раствора высокочистой меди ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$), приготовленного по методике⁶, с концентрацией меди 10 г/л.

В присутствии 10 г/л никеля максимально допустимая температура стадии пиролиза серебра также повысилась до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диапазон оптимальных температур атомизации не изменился (см. рис. 1, в). А вот чувствительность атомно-абсорбционного определения ухудшилась почти в три раза. Значение характеристической массы серебра при дозировании матричного раствора никеля с добавкой серебра составило 5,7 пг. По-видимому, это связано с влиянием большого количества никеля в графитовой печи на стадии атомизации, который способствует затруднению выхода аналита и, как следствие, падению чувствительности. Такой эффект наблюдается только в присутствии никеля. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что никель более термически устойчив ($t_{\text{плав}} = 1455\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с медью ($t_{\text{плав}} = 1083\text{ }^{\circ}\text{C}$) [20]. Результаты определения зависимости абсорбции Ag от концентрации никеля в растворе (рис. 3) показали выравнивание параметров пиков абсорбции в присутствии никеля в анализируемом растворе в содержании от 10 до 10^4 мг/л (10 г/л). Результаты измерения аналитического сигнала серебра с дозированием матричного раствора Ni (10 г/л) показали нулевые значения. Посторонних линий и полос поглощения во всем исследуемом диапазоне не наблюдается

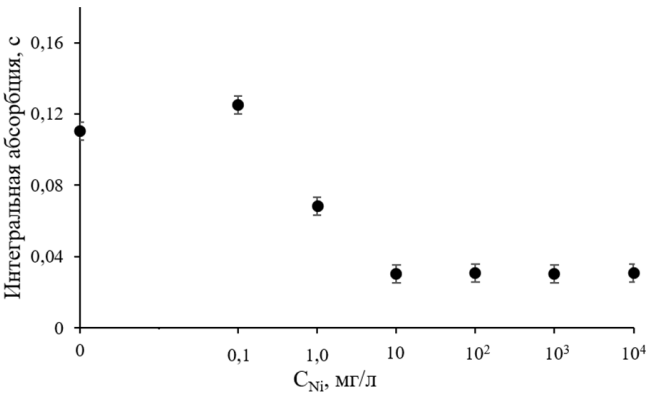


Рис. 3. Зависимость аналитического сигнала серебра (2 мкг/л) от концентрации никеля

Fig. 3. Dependence of the analytical signal of silver (2 µg/liter) on the concentration of nickel

(см. рис. 2, б). Температуры стадии пиролиза для всех анализируемых никельсодержащих растворов следует увеличить до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, достичь равной чувствительности атомно-абсорбционного определения Ag в его стандартных растворах и анализируемых растворах высокочистого никеля (с концентрацией 10 г/л) можно добавкой в стандартные растворы Ag не менее 10 мг/л никелевой основы.

По результатам изучения закономерностей атомно-абсорбционного определения серебра в матричных растворах Cu и Ni (с концентрацией 10 г/л каждого) методом ЭТААС высокого разрешения разработаны оптимальные температурные режимы программы атомизатора и количество вводимой никелевой основы (табл. 2).

Для обоснования способа градуировки построены зависимости абсорбции от концентрации аналита с использованием стандартных растворов Ag и матричных растворов Cu и Ni с добавлением серебра. Использованные режимы указаны в табл. 2.

Сравнение коэффициентов регрессий полученных градуировочных зависимостей (табл. 3) показало их различие не более чем на 15 % отн. Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования серии стандартных растворов элементов для градуировки.

Таблица 2. Режимы ЭТААС определения Ag в растворе высокочистых образцов Cu и Ni с концентрацией 10 г/л каждого
Table 2. ETAAS modes for the determination of Ag in a solution of high-purity Cu and Ni samples with a concentration of 10 g/liter each

Параметр	Значение параметра	
	Раствор Cu	Раствор Ni
Температура пиролиза, $^{\circ}\text{C}$	600 — для стандартного раствора Ag 800 — для образца раствора металла	800 — для всех растворов
Температура атомизации, $^{\circ}\text{C}$	1600	
Дозируемый объем, мкл	20	
Никелевая основа	Нет	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $C = 10\text{ мг/л}$

Таблица 3. Параметры градуировочных зависимостей при определении Ag**Table 3.** Parameters of calibration dependences in the determination of Ag

Матрица	Коэффициент регрессии градуировочных зависимостей	
	Для построения использовали стандартные растворы Ag	Для построения использовали матричные растворы с добавкой Ag
Cu	0,0191	0,0168
Ni	0,0086	0,0093

Разработанные условия определения Ag апробированы при анализе растворов высокочистых образцов меди и никеля (стандартные растворы Inorganic Ventures, США, с концентрацией 10 г/л каждого) методом «введено – найдено» (табл. 4). Максимальное значение относительной погрешности определения не превышает 13 %.

При определении примеси серебра в растворах высокочистой меди и никеля (в пересчете на пробу металла массой 1 г в 100 мл раствора) пределы обнаружения серебра составили: $1,8 \cdot 10^{-6}$ % в меди и $3,2 \cdot 10^{-6}$ % в никеле. Чувствительность определения серебра в никеле оказалась почти в два раза хуже по сравнению с образцом меди из-за подавляющего действия металлической основы анализируемой пробы. Медная матрица при концентрации 10 г/л металла практически не оказывает влияния на интегральный сигнал серебра. Поэтому линейные диапазоны градуировочных зависимостей также различаются и оставили 0,5 – 4 мкг/л при определении серебра в медных растворах и 1 – 4 мкг/л — в никелевых.

Заключение

Разработаны условия определения серебра в растворах высокочистых металлов Cu и Ni методом ЭТААС высокого разрешения с источником непрерывного спектра. С использованием процедуры пробоподготовки³ концентрация матричных металлов в анализируемых растворах составляет 10 г/л. Это соответствует соотношению масс металлической матрицы и аналита в графитовой печи атомизатора на уровне 10^6 . Использовали различные температурные условия программы атомизатора при измерениях с дозированием стандартных растворов Ag для градуировки и анализируемых проб. Для анализа растворов никеля необходимо введение никелевой основы с концентрацией 10 мг/л в градуировочные растворы серебра. Такие методические приемы позволили уравнивать чувствительность атомно-абсорбционного определения серебра при атомизации его стандартного раствора и растворов анализируемых проб меди и никеля с концентрацией 10 г/л, что позволило достичь пределов обнаружения серебра на уровне $n \cdot 10^{-6}$ %. При этом уда-

Таблица 4. Результаты определения Ag в образцах меди и никеля методом «введено – найдено» ($n = 5$; $P = 0,95$)**Table 4.** Results of Ag determination in copper and nickel samples by the recovery test ($n = 5$; $P = 0.95$)

Матрица	Введено, мкг/л	Найдено, мкг/л
Cu	1,0	$1,1 \pm 0,1$
	3,0	$3,2 \pm 0,2$
Ni	1,0	$1,1 \pm 0,2$
	3,0	$3,3 \pm 0,4$

лось исключить использование высокочистых матричных растворов меди и никеля для достижения полного совпадения состава градуировочных растворов и растворов проб, а количество вводимой никелевой основы составило на три порядка величины меньше.

Финансирование

Исследования проводились в рамках выполнения гранта РНФ (№ 23-23-00019) с использованием научного оборудования ЦКП «Эколого-аналитический центр» Кубанского госуниверситета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Досмухамедов Н. К., Жолдасбай Е. Е., Нурлан Г. Б., Курмансеитов М. Б. Влияние металлов-примесей на физико-химические свойства сверхчистой меди / Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. Т. 7. № 1. С. 25 – 30.
2. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. — М.: Инновационное машиностроение, 2016. — 360 с.
3. Carter S., Clough R., Fisher A., et al. Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials / J. Anal. At. Spectrom. 2022. Vol. 37. P. 2207 – 2281. DOI: 10.1039/d2ja90050e
4. Черникова И. И., Фурсова С. С., Ермолаева Т. Н. Анализ медных сплавов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и искровым пробоем / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 3. С. 11 – 19. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-11-19
5. Алексеев А. В., Якимович П. В., Кваченок И. К. Определение примесей в никеле методом ИСП-МС / Труды ВИАМ. 2020. Т. 86. № 2. С. 101 – 108. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-101-108
6. Цыганкова А. Р., Макашова Г. В., Шелпакова И. Р., Сапрыки А. И. Анализ триоксида молибдена методом ИСП-АЭС / Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 2. С. 182 – 186.
7. Захаров Ю. А., Кокорина О. Б., Хасанова С. И. и др. Прямое атомно-абсорбционное определение свинца и кадмия в пищевых молочных продуктах с помощью двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи / Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 3. С. 275 – 280. DOI: 10.15826/analitika.2013.17.3.002
8. Захаров Ю. А., Окунев Р. В., Хасанов С. И. и др. Атомно-абсорбционное определение золота и серебра в породах и рудах с помощью двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи / Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 4. С. 414 – 422. DOI: 10.15826/analitika.2013.17.4.006
9. Resano M., Arismendy M., Garcia-Ruiz E., et al. Solid sampling-graphite furnace atomic absorption spectrometry for the direct determination of silver at trace and ultratrace levels / Anal. Chim. Acta. 2006. Vol. 571. P. 142 – 149. DOI: 10.1016/j.aca.2006.04.037

10. Пупышев А. А. Атомно-абсорбционные спектрометры высокого разрешения с непрерывным источником спектра / Аналитика и контроль. 2008. Т. 12. № 3 – 4. С. 62 – 92.
11. Филатова Д. Г., Еськина В. В., Барановская В. Б., Карпов Ю. А. Современные возможности электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии высокого разрешения с непрерывным источником спектра / Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 5. С. 387 – 393.
DOI: 10.31857/S0044450220050047
12. De Loos-Vollebregt M. T. C., De Galan L. Furnace design in electrothermal atomization-atomic absorption spectrometry / Spectrochim. Acta, Part B. 1988. Vol. 43. N 4 – 5. P. 439 – 449.
DOI: 10.1016/0584-8547(88)80071-5
13. Bohrer D., Heitmann U., Huang M., et al. Determination of aluminum in highly concentrated iron samples: Study of interferences using high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry / Spectrochim. Acta, Part B. 2007. Vol. 62. N 9. P. 1012 – 1018. DOI: 10.1016/j.sab.2007.04.014
14. Dobrowolski R., Mróz A., Dąbrowska M., Olszański P. Solid sampling high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for gold determination in geological samples after preconcentration onto carbon nanotubes / Spectrochim. Acta, Part B. 2017. Vol. 132. P. 13 – 18.
DOI: 10.1016/j.sab.2017.03.011
15. da Silva A. F., Borges D. L. G., Lepri F. G., et al. Determination of cadmium in coal using solid sampling graphite furnace high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry / Anal. Bioanal. Chem. 2005. Vol. 382. N 8. P. 1835 – 1841. DOI: 10.1007/s00216-005-3327-9
16. Dittert I. M., Borges D. L. G., Welz B., et al. Determination of silver in geological samples using high-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry and direct solid sampling / Microchim. Acta. 2009. Vol. 167. P. 21 – 26.
DOI: 10.1007/s00604-009-0211-x
17. Бурьлин М. Ю., Копейко Е. С. Определение As, Bi, Pb, Sb, Sn в меди, никеле и сплавах на их основе методом электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 1. С. 12 – 21. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-1-12-22
18. Welz B., Becker-Ross H., Florek S., Heitmann U. High-Resolution continuum source AAS: The better way to do atomic absorption spectrometry. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, 2005. — 295 p.
DOI: 10.1002/3527606513
19. Burylin M. Y., Kopeyko E. S., Bauer V. A. Determination of Cu and Mn in Seawater By High-Resolution Continuum Source Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry / Anal. Lett. 2022. Vol. 55. N 10. P. 1663 – 1671.
DOI: 10.1080/00032719.2021.2020806
20. Пупышев А. А., Обогрелова С. А. Термостабилизация селена в графитовой печи на стадии пиролиза в присутствии никелевого химического модификатора / Аналитика и контроль. 2001. Т. 5. № 3. С. 275 – 288.
Vol. 86. N 2. P. 101 – 108 [in Russian].
DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-101-108
6. Tsygankova A. R., Makashova G. V., Shelpakova I. R., Saprykin A. I. ICP-OES analysis of molybdenum trioxide / Analit. Kontrol'. 2011. Vol. 15. N 2. P. 182 – 186 [in Russian].
7. Zakharov Yu. A., Kokorina O. B., Hasanova S. I., et al. Direct atomic absorption determination of lead and cadmium in the liquid milk foods using double-stage probe atomization in the graphite furnace / Analit. Kontrol'. 2013. Vol. 17. N 3. P. 275 – 280 [in Russian].
DOI: 10.15826/analitika.2013.17.3.002
8. Zakharov Yu. A., Okunev R. V., Irssov D. S., et al. Atomic absorption determination of gold and silver in rocks and ores using double-stage probe atomization in the graphite furnace / Analit. Kontrol'. 2013. Vol. 17. N 4. P. 414 – 422.
DOI: 10.15826/analitika.2013.17.4.006
9. Resano M., Arismendy M., García-Ruiz E., et al. Solid sampling-graphite furnace atomic absorption spectrometry for the direct determination of silver at trace and ultratrace levels / Anal. Chim. Acta. 2006. Vol. 571. P. 142 – 149.
DOI: 10.1016/j.aca.2006.04.037
10. Pupyshv A. A. The high-resolution continuum source atomic absorption spectrometers / Analit. Kontrol'. 2008. Vol. 12. N 3 – 4. P. 62 – 92 [in Russian].
11. Filatova D. G., Es'kina V. V., Baranovskaya V. B., Karпов Yu. A. Present-day possibilities of high-resolution continuous-source electrothermal atomic absorption spectrometry / J. Anal. Chem. 2020. Vol. 75. N 5. P. 563 – 568.
DOI: 10.1134/S1061934820050044
12. De Loos-Vollebregt M. T. C., De Galan L. Furnace design in electrothermal atomization-atomic absorption spectrometry / Spectrochim. Acta, Part B. 1988. Vol. 43. N 4 – 5. P. 439 – 449.
DOI: 10.1016/0584-8547(88)80071-5
13. Bohrer D., Heitmann U., Huang M., et al. Determination of aluminum in highly concentrated iron samples: Study of interferences using high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry / Spectrochim. Acta, Part B. 2007. Vol. 62. N 9. P. 1012 – 1018. DOI: 10.1016/j.sab.2007.04.014
14. Dobrowolski R., Mróz A., Dąbrowska M., Olszański P. Solid sampling high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for gold determination in geological samples after preconcentration onto carbon nanotubes / Spectrochim. Acta, Part B. 2017. Vol. 132. P. 13 – 18.
DOI: 10.1016/j.sab.2017.03.011
15. da Silva A. F., Borges D. L. G., Lepri F. G., et al. Determination of cadmium in coal using solid sampling graphite furnace high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry / Anal. Bioanal. Chem. 2005. Vol. 382. N 8. P. 1835 – 1841. DOI: 10.1007/s00216-005-3327-9
16. Dittert I. M., Borges D. L. G., Welz B., et al. Determination of silver in geological samples using high-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry and direct solid sampling / Microchim. Acta. 2009. Vol. 167. P. 21 – 26.
DOI: 10.1007/s00604-009-0211-x
17. Burylin M. Yu., Kopeiko E. S. Determination of As, Bi, Pb, Sb, and Sn in copper, nickel, and alloys on their basis by electrothermal atomic absorption spectrometry / Inorg. Mater. 2022. Vol. 58. N 14. P. 1405 – 1414.
DOI: 10.1134/S0020168522140059
18. Welz B., Becker-Ross H., Florek S., Heitmann U. High-Resolution continuum source AAS: The better way to do atomic absorption spectrometry. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, 2005. — 295 p.
DOI: 10.1002/3527606513
19. Burylin M. Y., Kopeyko E. S., Bauer V. A. Determination of Cu and Mn in Seawater By High-Resolution Continuum Source Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry / Anal. Lett. 2022. Vol. 55. N 10. P. 1663 – 1671.
DOI: 10.1080/00032719.2021.2020806
20. Pupyshv A. A., Obogrelova S. A. Thermal stabilization of selenium in a graphite furnace at the pyrolysis stage in the presence of a nickel chemical modifier / Analit. Kontrol'. 2001. Vol. 5. N 3. P. 275 – 288 [in Russian].

REFERENCES

1. Dosmukhamedov N. K., Zholdasbay E. E., Nurlan G. B., Kurmansaitov M. B. Influence of precision metals on physico-chemical properties of superclean copper / Mezhdunar. Zh. Prikl. Fund. Issl. 2018. Vol. 7. N 1. P. 25 – 30 [in Russian].
2. Osintsev O. E., Fedorov V. N. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: a reference book. — Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016. — 360 p. [in Russian].
3. Carter S., Clough R., Fisher A., et al. Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials / J. Anal. At. Spectrom. 2022. Vol. 37. P. 2207 – 2281. DOI: 10.1039/d2ja90050e
4. Chernikova I. I., Fursova S. S., Ermolaeva T. N. Analysis of copper alloys by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry with spark sampling / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 3. P. 11 – 19 [in Russian].
DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-11-19
5. Alekseev A. V., Yakimovich P. V., Kvachonok I. K. Determination of impurities in nickel by ICP-MS / Tr. VIAM. 2020.