

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543

ТИГЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЙ АТОМИЗАТОР С ЯЧЕЙКАМИ-КАНАЛАМИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОРОШКОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Валентин Николаевич Орешкин¹, Григорий Ильич Цизин²

¹ Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра аналитической химии, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Григорий Ильич Цизин,
tcsin@analyt.chem.msu.ru

Аннотация. Предложено конструктивное решение графитового тигельного атомизатора с ячейками-каналами для прямого атомно-абсорбционного анализа порошковых образцов. Зона испарения в тигле дополнена графитовым блоком (контейнером) с ячейками-каналами для размещения и разделения дозируемой массы порошкового образца. Таким образом, изменены условия термического разложения и испарения органоминеральных образцов, уменьшены помехи и снижены пределы обнаружения элементов (Ag, Bi, Cd, Tl) в концентратах и взвесях природных вод.

Ключевые слова: Графитовый тигельный атомизатор, электротермический атомно-абсорбционный анализ твердых образцов

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-1-55-63

Финансирование. Статья выполнена в рамках проекта Минобрнауки РФ № 122041200035-2. «Разработка научных основ методов снижения техногенного загрязнения окружающей среды и экомониторинг состояния естественных и антропогенно измененных экосистем» и в рамках работ по теме госзадания № АААА-А21-121011990021-7 «Создание функциональных материалов, высокоеффективных способов и средств химического анализа для мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, перехода к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, персонализированной медицине, технологиям здоровьесбережения, создания безопасных и качественных продуктов питания, лекарственных препаратов».

Для цитирования: Орешкин В.Н., Цизин Г.И. Тигельный электротермический атомизатор с ячейками-каналами для анализа порошковых образцов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 1. С. 55–63.

ORIGINAL ARTICLE

CRUCIBLE ELECTROTHERMAL ATOMIZER WITH CHANNEL CELLS
FOR ANALYSIS OF POWDER SAMPLES

Valentin N. Oreshkin¹, Grigory I. Tsizin²

¹ Institute of Fundamental Problems of Biology RAS, Pushchino, Russia

² Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Analytical Chemistry, Moscow, Russia

Corresponding author: Grigory Ilyich Tsizin, tsizin@analyt.chem.msu.ru

Abstract. A constructive solution of a graphite crucible atomizer with channel cells for direct atomic absorption analysis of powder samples is proposed. The evaporation zone in the crucible is complemented by a graphite block (container) with channel cells for placing and separating the dosed mass of the powder sample. Thus, the conditions of thermal decomposition and evaporation of organomineral samples have been changed, interference has been reduced and the detection limits of elements (Ag, Bi, Cd, Tl) in concentrates and suspensions of natural waters have been reduced.

Keywords: Key words: graphite crucible atomizer, electrothermal atomic absorption analysis of solid samples

Financial Support. The article was carried out within the framework of the project of the Ministry of Education and Science No. 122041200035-2. “Development of scientific foundations for methods for reducing technogenic environmental pollution and environmental monitoring of the state of natural and anthropogenically modified ecosystems” and within the framework of work on the topic of state assignments No. AAAA-A21-121011990021-7 “Creation of functional materials, highly effective methods and means of chemical analysis for monitoring and forecasting the state of the environment, the transition to highly productive and environmentally friendly agro- and aquaculture, personalized medicine, technologies health preservation, creation of safe and high-quality food products and medicines”.

For citation: Oreshkin V.N., Tsizin G.I. Crucible electrothermal atomizer with channel cells for analysis of powder samples // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 1. S. 55–63.

В различных областях, и особенно в экоаналитике и геохимии, для определения ультрамалого количества рассеянных элементов (Ag, Bi, Cd и др.) в объектах окружающей среды и геологических образцах часто применяют электротермический атомно-абсорбционный (АА) анализ, в том числе твердых проб (порошков, суспензий). В этом случае, в отличие от альтернативного варианта с полным растворением образцов, снижается возможность загрязнения образцов при контакте с посудой, реагентами, уменьшаются потери элементов, особенно легколетучих, на стадии разложения. При растворении образцов неизбежно их разбавление, что снижает чувствительность анализа. Преимущества очевидны, поэтому продолжается разработка способов прямого АА-анализа твердых

образцов и концентратов вод, помещаемых в графитовые электротермические атомизаторы (куветы, печи, тигли, стержни и др.) и применяемых для одноэлементных и многоэлементных определений [1–14]. При использовании атомизаторов твердых образцов непросто бороться с неизбежными неселективными и матричными помехами. Для уменьшения влияния состава используют разные подходы. Давно известным и эффективным [15] является способ предварительного селективного фракционного испарения образца с конденсацией паров на вспомогательной поверхности-приемнике для последующего независимого атомно-эмиссионного (АЭ) и АА-анализа термомодифицированной матрицы-конденсата, т.е. проведение двухстадийного цикла [5, 8, 16–22]. Этот способ применяют в

усовершенствованных моделях атомизаторов разных типов. В исследованиях предпочтита- ют использовать тигельные конструкции-атомизаторы с поперечным нагревом, имеющие вертикально расположенные зоны испарения, конденсации и атомизации. Эти атомизаторы заведомо проигрывают в чувствительности по сравнению с горизонтально расположенными трубчатыми печами. Однако в таких атомизаторах достаточно просто экспериментально выбирать варианты термического разложения и испарения-конденсации для уменьшения помех с учетом матричного состава органоминеральных образцов массой 10 мг и более при определении элементов на уровне ниже кларковых значений [8, 13, 14].

Существенная проблема состоит в том, что возможность определения следовых количеств элементов затруднена, если стадия

термического разложения и испарения образца, размещенного «кушкой» на дне тигля, характеризовалась интенсивным испарением основы, выбросом крупных и мелких частиц и увеличением неселективных помех в аналитической зоне (общий недостаток атомизаторов, использующих фракционную конденса- цию). Весьма простой подход для уменьше- ния негативных эффектов может заключаться в изменении конструкции тигельной зоны испарения и особенностей размещения образца в этой зоне, влияющих на условия термиче- ского разложения и испарения органических и минеральных компонентов.

В настоящем сообщении предложена кон- струкция тигельного атомизатора с ячейками-каналами, испытанный при определении эле- ментов в порошковых образцах концентратов и взвесей природных вод.

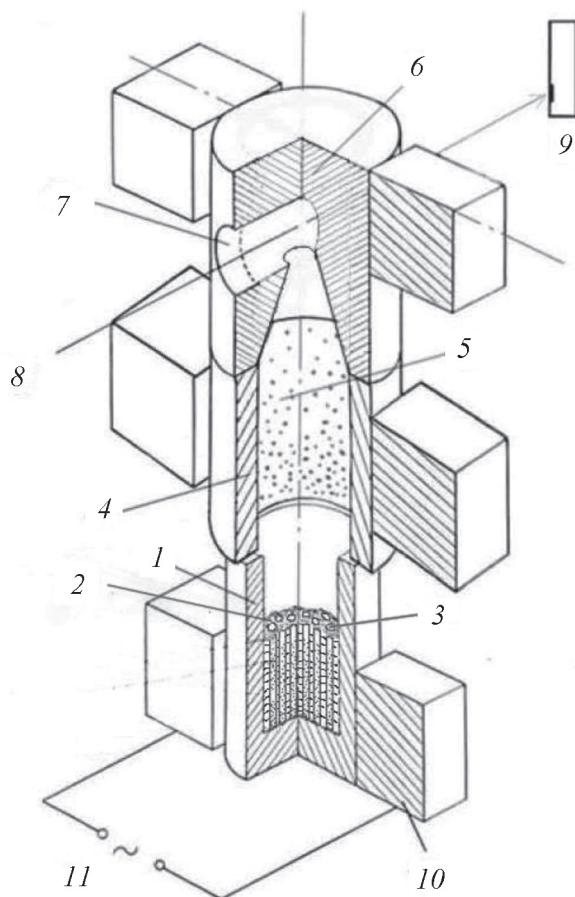


Рис. 1. Графитовый тигельный электротермический атомизатор твердых образцов с зонами испарения, конденсации и атомизации: 1 – тигель (зона испарения), 2 – контейнер, 3 – ячейки-каналы контейнера с порошковым образцом, 4 – цилиндрический блок (зона конденсации), 5 – конденсат, 6 – цилиндрический блок (зона атомизации), 7 – просвечиваемое отверстие (аналити- ческая зона), 8 – источник излучения, 9 – спектрометр, 10 – независимые графитовые держатели (электроконтакты), 11 – источник питания

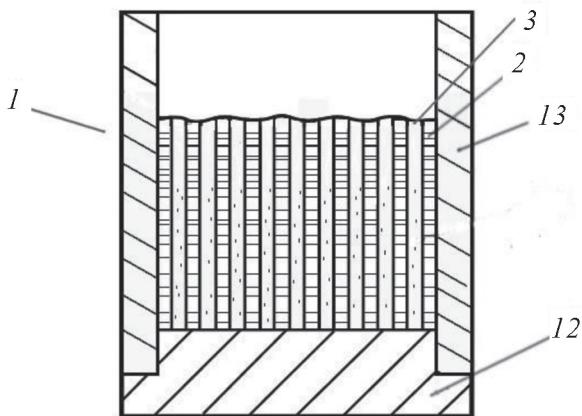


Рис. 2. Модификация графитового тигля с ячейками-каналами:
1 – разборная модель графитового тигля; 2 – многоканальный контейнер; 3 – ячейки-каналы контейнера с порошковым образцом; 12 – основание; 13 – цилиндр

Экспериментальная часть

Оборудование. В настоящей работе, как и в предыдущих [8, 13, 14], использовали АА-спектрофотометр «Сатурн-2» и экспериментальную многоканальную АА-установку с модификациями блока атомизации, рассмотренного в [22]. Между графитовыми сменными охлаждаемыми электроконтактами блока помещали тигельный атомизатор лабораторного изготовления типа «тигель-цилиндр-цилиндр» (рис. 1, 2). Тигель изготовлен в двух модификациях (монолитная и разборная) и снабжен дополнительным графитовым блоком-контейнером, имеющим сквозные вертикальные ячейки-каналы (до 30) малого диаметра (в пределах 0,2–1,2 мм). Внутренний диаметр тигля и цилиндров составлял 5–8 мм. Во втором цилиндре расположены конусная зона и просвечивающие отверстия диаметром 2,5–4 мм. Высота блоков составляла ≤15 мм, а высота контейнера с каналами была ≤12 мм (рис 1, 2). При определении элементов в образцах использовали контейнер высотой 8–10 мм с ячейками-каналами диаметром 0,3–0,8 мм. Все блоки атомизатора изготовлены из мелкозернистого газопроницаемого графита типа МПГ, легко поддающегося обработке [23]. Другие марки графитовых материалов не использовали. Внутренние поверхности блоков (кроме контейнера) предпочтительно применять с пиролитическим покрытием для уменьшения диффузионных потерь. Режим нагрева регулировали с использованием серийных блоков питания (БП-26) и блоков управления (БУ-26). Источниками излучения служили

лампы с полым катодом (ЛСП-1,2) или высокочастотные шариковые лампы (ВСБ-2). Многоканальную экспериментальную АА-установку (несовершенную с точки зрения сегодняшнего дня) неоднократно применяли и ранее [14, 22], а в настоящей работе использовали для одновременного определения трех элементов в уникальных образцах малой массы.

Образцы. Экспериментальные работы проведены с коллекционными образцами концентратов (ДЭТАТА-сорбент + взвесь) и взвесей, полученными для оценки общего содержания растворенных и взвешенных форм элементов в речной и морской воде, а также отдельно взвешенных форм, что важно для целей геохимии и экологии [13, 14]. В графитовый тигель, фиксированный в гнезде подложки из оргстекла, с помощью неметаллического пинцета помещали контейнер с ячейками-каналами и дозировали общую массу (2–5 мг) порошкового образца с частицами менее 0,1 мм, которая разделялась и распределялась на отдельные малые дозы в каналах контейнера. При этом использовали прием встряхивания тигля с контейнером для идентичности распределения. Затем проводили сборку общей конструкции атомизатора.

Определение элементов. На первой стадии осуществляли термическое разложение, озление и фракционное испарение порошкового образца, размещенного в ячейках-каналах контейнера при постепенном увеличении температуры до 1700–2000 °С за 20–60 с. На второй стадии проводили импульсный нагрев (4–8 с) цилиндра

с конденсатом. С некоторым опережением проводили нагрев второго цилиндра с аналитической зоной до температуры 1600–1900 °С при выдерживании нагрева тигля. Использовали амплитудный способ регистрации и измеряли высоту сигнала – пика (Ag 328,1 нм; Bi 306,8 нм; Cd 228,8 нм; Tl 276,8 нм). В качестве образцов сравнения применяли другие коллекционные образцы близкого макросостава, в которых элементы были определены с применением нескольких методик, в том числе сорбционным АА-методом с разложением твердых фаз, а также способом добавок при введении растворов с известным содержанием элементов в порошковые образцы [2, 13, 14].

Результаты и их обсуждение

Простые и известные модели графитового тигельного атомизатора с поперечным нагревом впервые были использованы для фракционного испарения твердых образцов, конденсации паров на противоэлектроде и последующего анализа конденсата в АЭ-методе [15]. Применение тиглей в двухстадийном цикле оказалось перспективным и в АА-анализе образцов сложного состава [8, 14, 19, 22]. Для более эффективного уменьшения влияния состава на базе тигля конструировали новые модели атомизаторов твердых образцов с зонами испарения, конденсации и атомизации [8, 13, 14]. Графитовый тигель

(зона испарения) был «достроен» вертикально расположенным графитовыми блоками с зонами конденсации и атомизации. Таким образом, были расширены функции атомизаторов в аналитическом цикле, показана возможность одновременной конденсации паров образца в двух независимых зонах (нагретой и ненагретой) или последовательного низко- и высокотемпературного испарения матриц и получения двух конденсатов, которые анализировали в моделях с двумя зонами испарения и общей аналитической зоной [8, 13]. Однако использование таких более продолжительных процедур не всегда позволяло решать задачи по определению следов элементов в образцах, содержащих литогенные, биогенные, хемогенно-гидрогенные компоненты (концентраты и взвеси природных вод, почвы, донные осадки, горные породы и др.). При нагревании и испарении образцов массой до 5 мг и более, помещенных на дно тигля, часто наблюдали бурные взрывные процессы термического разложения органических и минеральных фаз, взаимодействие продуктов разложения, выделение газов и форсированный выброс неиспарившихся частиц в зону конденсации (нередко в начальной стадии нагревания), т.е. не достигалось необходимой термической модификации компонентов и упрощения состава конденсата.

Постоянно возникал вопрос о необходимости уменьшения интенсивности этих эффектов,

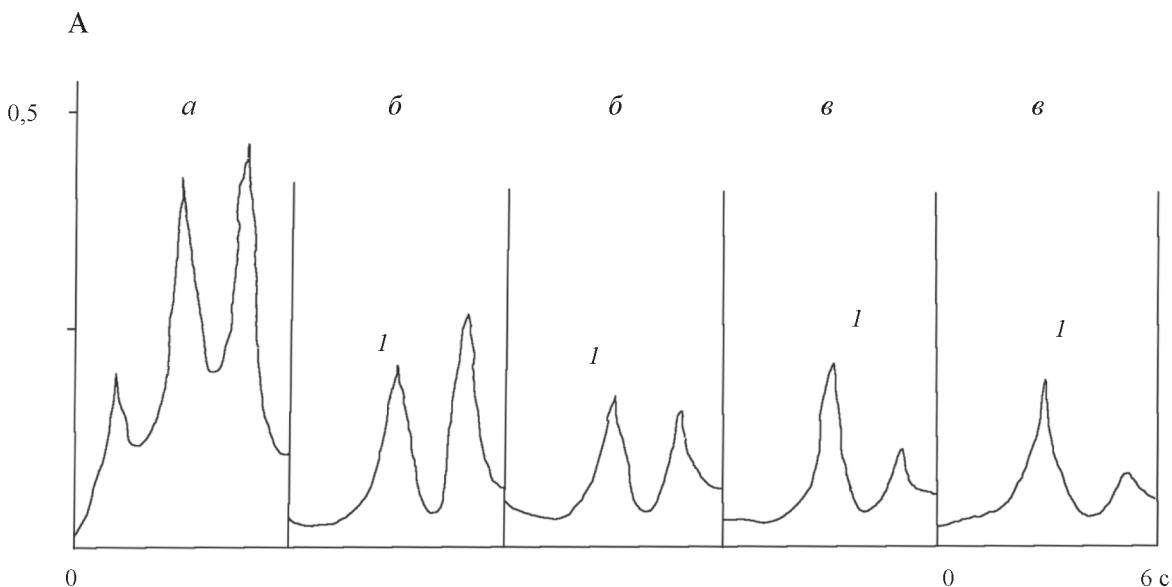


Рис. 3. Сигналы абсорбции, полученные при определении серебра ($6,3 \cdot 10^{-7}$ мг) в концентрате морской воды (3 мг), содержащем органические и минеральные частицы: *I* – аналитический сигнал, *а* – тигель обычного типа, *б* – тигель с 10 и 20 ячейками-каналами диаметром 0,6 мм, *в* – тигель с 10 и 20 ячейками-каналами диаметром 0,3 мм

в частности, за счет изменения конструкции зон атомизатора, особенности размещения образца и условий испарения. Попытки испарять сложные летучие матрицы из полости тигля, закрытой пористой графитовой диафрагмой, приводили к изменениям структуры графита и условий фильтрации паров, плохой воспроизведимости и даже самой возможности выделения сигнала. Задача упрощается, если учесть известные способы по пробоподготовке объектов окружающей среды и геологических образцов к элементному физико-химическому анализу, в том числе АА-анализу, обеспечивающие гомогенизацию и измельчение до частиц менее 0,1 мм (0,05–0,08) [24, 25]. Поэтому в экспериментах были испытаны тигли с измененной конфигурацией рабочей зоны испарения, влияющей на распределение и условия испарения дозируемой навески образца с частицами менее 0,1 мм.

Новизна и суть предлагаемого конструктивного решения модели атомизатора заключаются в следующем. Зону испарения в тигле можно дополнить графитовым блоком-контейнером из пористого газопроницаемого графита для формирования геометрических особенностей этой зоны с ячейками-каналами малого диаметра, разделяющими, подобно ситу, навеску порошкового образца на отдельные, изолированные друг от друга стенками каналов микрообразцы. Такое решение обеспечивает размещение в ячейках-каналах, которые являются независимыми зонами испарения, малых доз образца, причем без уменьшения общей анализируемой массы, т.е. представительности пробы (рис. 1, 2).

Особенности конструкции атомизатора. Модель тигельного атомизатора с ячейками-каналами выполнена на базе ранее использованных конструкций [8, 13, 14]. Атомизатор состоял из трех графитовых цилиндрических блоков, помещенных между независимыми электрокон-

тактами, которые формируют зоны испарения, конденсации и атомизации (рис. 1). Первый блок – графитовый тигель с установленным в нем графитовым контейнером (рис. 2). Тигель может быть монолитным или представлять разборную конструкцию из сменного графитового основания, на которое устанавливается полый цилиндр. Разборная конструкция упрощает замену использованного контейнера без существенной разборки всего устройства. Контейнер имеет цилиндрическую форму для размещения и разделения порошкового образца, в нем выполнены вертикальные сквозные отверстия, т.е. ячейки-каналы малого диаметра. Второй цилиндрический блок расположен над тиглем с небольшим теплоизолирующим зазором (0,5–2 мм). Третий цилиндрический блок установлен на торцевую поверхность второго блока и формирует зону атомизации с конусной внутренней поверхностью, переходящей в просвечиваемый аналитический объем в цилиндрическом отверстии с возможностью локализации паров. Атомизатор обеспечивает последовательное применение первой и второй стадий аналитического цикла.

Результаты эксперимента

Атомизатор использован для определения Ag, Bi, Cd, Tl в коллекционных органоминеральных образцах концентратов и взвесей речных и морских вод [13]. Выбор элементов обусловлен задачами геохимических и экологических исследований, а не их летучестью. Масса этих образцов при существующих методах пробоотбора и пробоподготовки всегда ограничена, и возможности других тигельных атомизаторов часто не могут быть использованы. На основании данных предыдущих работ [8, 13, 14] выбраны образцы, характеризующиеся высоким уровнем неселективного

Таблица 1

Пределы обнаружения элементов в порошковых концентратах и взвесях речных и морских вод (ppm, $3S_{x,0}$ критерий, $n = 3-4$)

Элемент	Тигель с ячейками-каналами	Тигель обычного типа
Ag	0,01–0,03	0,05–0,1
Cd	0,01–0,03	0,05–0,1
Tl	0,06–0,5	0,3–1,0
Bi	0,05–0,3	0,3–1,0

Таблица 2

Некоторые результаты определения элементов в концентратах и взвесях речной и морской воды (ppm) [13–14]

Элемент	Концентрат речной воды (ДЭТАА-сорбент+взвесь, р. Ока), ppm			Речная взвесь (устье р. Амазонка)			Морская взвесь (стуарий р. Амазонка)			Концентрат морской воды (ДЭТАА-сорбент+взвесь, Атлантический океан)	
	тигель с ячейками- каналами	тигель обычного типа	AA метод	тигель с ячейками- каналами	тигель обычного типа	AA метод [2, 8]	тигель с ячейками- каналами	тигель обычного типа	тигель с ячейками- каналами	тигель обычного типа	тигель обычного типа
Ag	0 0,1 0,15±0,03	0,07±0,01 <0,1 0,13±0,05	0,075±0,010 0,041±0,011	<0,1 0,18±0,02 0,16±0,03	0,05 0,14 0,17±0,03	0,05 0,14 ≤0,1	0,10±0,02 0,17±0,03 0,54±0,09	<0,1 ≤0,1 <1	0,19±0,03 0,73±0,12 0,40±0,05	0,3±0,1 1,0±0,2 <0,5	<0,5
Cd	0 0,5 0,83±0,15	0,25±0,06 0,28±0,05 0,87±0,06	0,31±0,08 0,24±0,04 0,21±0,05	<1 0,8±0,1 <1 0,66±0,10 1,0±0,2	0,14 0,30 0,30 <0,5 <0,5	0,14 0,30 0,30 <0,5 <0,5	0,14 0,30 0,30 <0,5 <0,5	<1 0,54±0,09 0,30±0,07 0,10 0,11±0,02	<1 0,40±0,05 <1 0,11±0,02 <0,5	<0,5 1,0±0,2 <0,5	<0,5
Tl	0 0,5 0,5	0,66±0,10 1,0±0,2 0,15±0,04	0,8±0,1 0,21±0,05 0,09±0,02	<1 0,5 0,60±0,10	0,30 0,10 0,10	0,30 0,10 0,10	0,30 0,10 0,10	<1 0,30±0,07 0,11±0,02 <0,5	<1 0,40±0,05 0,11±0,02 <0,5	<0,5 1,0±0,2 <0,5	<0,5
Bi	0 0,5 0,5	0,72±0,09 0,72±0,09	0,60±0,10	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1

При мечани: длительность стадии термического разложения и фракционного испарения при постепенном повышении температуры – 30 с (речные взвеси); 45 с (концентрат речной и морской воды и морская взвесь); конечная температура 1900 °C (Ag, Bi), 1800 °C (Cd, Tl). Продолжительность стадии атомизации конденсата 5–7 с, температура 1800 °C (Ag, Bi), 1700 °C (Cd, Tl); масса образца 2–5 мг, 10–20 ячеек каналов контейнера диаметром 0,3–0,8 мм.

поглощения и значениями отношения сигнала абсорбции элемента к сигналу абсорбции неселективного поглощения $<<1$ (всего 17 образцов). Для улучшения метрологических характеристик определения элементов необходимо уменьшать неселективные помехи, в основном за счет поступления частиц в аналитическую зону с газовой фазой образца. Поэтому были получены данные о значениях сигнала абсорбции неселективного поглощения при определении элементов в порошковых образцах концентратов и взвесей с применением атомизаторов с различной конструкцией зоны испарения. Результаты показали, что применение тигельного атомизатора с контейнером в зоне испарения, в которой общая масса образца разделялась на малые дозы и распределялась в независимые ячейки-каналы, обеспечивает снижение уровня неселективного поглощения по сравнению с атомизатором с навеской образца, размещенной на дне тигля (значения уровня неселективного поглощения составили $<0,01$ –0,4 и 0,1–1,2 соответственно).

В качестве примера на рис. 3 показана регистрация сигналов абсорбции при определении Ag в образце концентрата морской воды, содержащем органические и минеральные взвешенные частицы. Эксперимент показал, что возможно определение элемента в образце с применением контейнера с ячейками-каналами диаметром 0,6 и 0,3 мм. При уменьшении диаметра ячеек уровень неселективного поглощения уменьшается, но величина аналитического сигнала изменяется мало. Такая тенденция, очевидно, является следствием конструктивных изменений в зоне испарения. Термическое разложение, озоление и испарение разделенных малых количеств образца в узких каналах с равным внутренним объемом рабочих зон происходит в более близких условиях с уменьшенной интенсивностью выделения газообразных продуктов, влияния конвекционного потока, эффектов взаимодействия продуктов разложения. При этом пористая газопроницаемая структура графитовых стенок каналов обуславливает возможность межканальной диффузии (фильтрации) паров образца, задержку испарения, увеличение времени пребывания твердых частиц в зоне испарения и их взаимодействия с поверхностью каналов. Все эти факторы приводят, вероятно, к получению суммарного синергетического эффекта и способствуют большей степени атомизации компонентов образца в процессе

диффузионно-конвекционного переноса паров в ячейках-каналах контейнера и снижению или отсутствию выброса неиспарившихся частиц. В результате достигаются увеличение значений отношения сигнал/шум в аналитической зоне и снижение пределов обнаружения элементов в образцах сложного состава (табл. 1). В табл. 2 приведены некоторые результаты определения элементов в органоминеральных образцах концентратов и взвесей природных вод при контроле правильности с применением независимого сорбционного АА-метода и способа добавок. Эффективность применения модели атомизатора следует из данных табл. 2, поскольку элементы были определены в каждом из анализируемых уникальных образцов. Пределы обнаруже-

ния элементов снижены, по крайней мере, в 2–5 раз по сравнению с использованием варианта анализа, в котором общая масса образца была традиционно размещена на дне тигля. Относительное стандартное отклонение при определении элементов вдали от предела обнаружения (на кларковом уровне содержаний) обычно не превышает 0,20, что вполне удовлетворительно для целей геохимии и экологии.

В заключение отметим, что в работе показан пример решения аналитической задачи по определению следов элементов в органоминеральных образцах с применением новой модели графитового тигельного атомизатора с ячейками-каналами для размещения порошкового образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львов Б.В. Атомно-абсорбционной спектрометрии – пятьдесят лет // Журн. аналит. химии. 2005. Т. 60. № 4. С. 434.
2. Золотов Ю.А., Цизин Г.И., Дмитриенко С.Г., Моросанова Е.И. Сорбционное концентрирование из растворов. Применение в неорганическом анализе. М., 2007. 320 с.
3. Welz B., Vale M.G.R., Borges D.L.G., Heitmann V. // Anal. Bioanal. Chem. 2007. Vol. 389. N 7–8. P. 2085 (DOI: 10.1007/s00216-007-1555-x).
4. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ М., 2009. 784 с.
5. Волынский А.Б. // Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66. № 11. С. 1164 (DOI: 10.1134/S1061934811110165).
6. Evans E.H., Pisonero J., Smith C.M.M. // J. Anal. At. Spectrom. 2013. Vol. 28. P. 779 (DOI: 10.1039/D4JA90018A).
7. Kurfurst V. Solid sample analysis: Direct and slurry sampling using GF-AAS and ETA-ICP. Berlin Springer, 2013. 427 p.
8. Орешкин В.Н., Цизин Г.И. // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69. № 3. С. 307 (DOI: 10.7868/S004450214030141).
9. Resano M., Aramendia M., Belarra M.A. // J. Anal. At. Spectrom. 2014. Vol. 29. N 12. P. 2229 (DOI: 10.1039/C6JA00280C).
10. Кацков Д.А. // Аналитика и контроль. 2018. Т. 22. № 4. С. 350 (DOI: 10.15826/analitika.2018.22.4.001).
11. Кацков Д.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. С. 5 (DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-5-17).
12. Филатова Д.Г., Еськина В.В., Барановская В.Б., Карпов Ю.А. // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 5. С. 387 (DOI: 10.31857/S004450220050047).
13. Орешкин В.Н., Цизин Г.И., Таций Ю.Г. // Геохимия. 2018. № 3. С. 290 (DOI: 10.7868/S0016752518030093).
14. Орешкин В.Н., Цизин Г.И. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2023. Т. 64. № 3. С. 256 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-3-256-264).
15. Спектральный анализ чистых веществ. Л., 1971. Под ред. Х.И. Зильберштейна. 416 с.
16. Herman G. Trein A., Matz R., Gafurov M., Gilmutdinov A. Kh., Nagulin K.Y., Frech W., Bjorn E., Grinshtain I.L., Vasilieva L.A. // Spectrochim. Acta. 2004. Vol. 59B. N 5. P. 737 (DOI: 10.1016/j.sab.2004.02.008).
17. Захаров Ю.А., Кокорина О.Б., Лысогорский Ю.В., Староверов А.Е. // Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67. № 8. С. 790 (DOI: 10.1134/S1061934812060214).
18. Захаров Ю.А., Кокорина О.Б. Пат. России. № 2273842.
19. Нагулин К.Ю., Цивильский И.В., Назмиеv П.И., Гильмутдинов А.Х. // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 12. С. 46 (DOI: 10.1364/JOT.79.000781).
20. Gilmutdinov A., Sperling M., Welz B. Electrothermal atomization means for analytical spectrometry. US Patent. № 5981912. Date of Patent: Nov. 9, 1999.
21. Орешкин В.Н. Способ электротермического атомно-абсорбционного анализа состава порошковых образцов и устройство для его осуществления. Пат. России № 2806706.
22. Орешкин В.Н., Беляев Ю.И., Внуковская Г.Л. // Заводская лаборатория. 1990. Т. 56. № 2. С. 50.
23. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / Справочник. Под ред. В.П. Соседова. М., 1975. 336 с.
24. Методические основы исследования химического состава горных пород, руд и минералов. / Под ред. В.Г. Остроумова. М., 1979. 400 с.
25. Карпов Ю.А., Савостин А.П. Методы пробоотбора и пробоподготовки. М., 2003. 243 с.

Информация об авторах

Валентин Николаевич Орешкин – вед. науч. сотр. Института фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия, канд. хим. наук (ifpb@issp.serpukhov.su);

Григорий Ильич Цизин – ст. науч. сотр. химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук, профессор (tsisin@analyt.chem.msu.ru).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025;
одобрена после рецензирования 16.09.2025;
принята к публикации 25.10.2025.