УДК 543.423:621.387.143:502.12(575.2-25)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-14-19

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХСТРУЙНЫХ ПЛАЗМАТРОНОВ

А. Чылымов, Рыскул кызы Гулзат, Г.Ж. Доржуева

Аннотация. Проблема определения концентрации микроэлементов для контроля экологической безопасности сточных и природных вод, отрицательно воздействующих на окружающую среду, является весьма актуальной, и необходимы научные методики надежно и достоверно определяющие вредные загрязнители. В настоящей работе для определения микроэлементов в водопроводной воде г. Бишкека и в лечебной природной соли «Чон-Туз» разработана методика на базе атомно-эмиссионного анализа с использованием двухструйного плазматрона. Определен оптимальный режим измерений в потоке плазмы, дуговой генератор плазмы, который учитывает влияние силы тока дуги, расход рабочего газа, влияние основного компонента жидкой пробы. Используя разработанную методику, в жидких пробах определены концентрации марганца, кобальта, бора, ванадия. Также представлены результаты полуколичественного анализа лечебной природной соли «Чон-Туз». Для контроля экологической безопасности сточных и природных вод наиболее экспрессным является метод атомно-эмиссионной спектроскопии, который отвечает большинству требований, предъявляемых к определению микроэлементов.

Ключевые слова: плазматрон; поток плазмы; микроэлементы; концентрация; стандартный образец; анализ; концентрация природных вод.

ЭКИ АГЫМДУУ ПЛАЗМАТРОНДОРДУ КОЛДОНУУ МЕНЕН ЭКОЛОГИЯЛЫК ОБЪЕКТИЛЕРДИ ИЗИЛДӨӨ ЫКМАЛАРЫ

А. Чылымов, Рыскул кызы Гулзат, Г.Ж. Доржуева

Аннотация. Айлана-чөйрөгө терс таасирин тийгизген саркынды суулардын жана табигый суулардын экологиялык коопсуздугун көзөмөлдөө үчүн, микроэлементтердин концентрациясын аныктоо маселеси өтө актуалдуу болуп саналат жана зыяндуу булгоочу заттарды ишенимдүү жана так аныктоо үчүн илимий ыкмалар зарыл. Бул изилдөөдө эки агымдуу плазматрондун жардамы менен атомдук эмиссиялык анализдин негизинде Бишкектин суу түтүктөрүндөгү микроэлементтерди жана «Чоң-Туз» дарылык табигый тузун аныктоочу ыкма иштелип чыккан. Эки агымдуу плазматрондо оптималдуу өлчөө режими жаа генератор плазмасынын таасирин, жумушчу газдын агымынын ылдамдыгын жана суюк үлгүдөгү негизги компоненттин таасирин эске алуу менен аныкталган. Иштелип чыккан ыкманы колдонуу менен суюк үлгүлөрдөгү марганецтин, кобальттын, бордун жана ванадийдин концентрациялары аныкталган. «Чон-Туз» табигый дары тузунун жарым сандык анализинин натыйжалары да келтирилген. Агын суулардын экологиялык коопсуздугун көзөмөлдөөдөө эң ыңгайлуу ыкмалардын бири болуп, атомдук-эмиссиялык спектроскопия ыкмасы болуп эсептелет. Бул ыкма аныктоого коюлган талаптардын көпчүлүгүнө жооп берет.

Түйүндүү сөздөр: плазматрон; плазма агымы; микроэлементтер; концентрация; стандарттык үлгү; анализ; концентрация жаратылыш суулары.

METHODS FOR STUDYING ECOLOGICAL OBJECTS USING TWO-JET PLASMATRONS

A. Chylymov, Ryskul kyzy Gulzat, G.J. Dorzhueva

Abstract. The problem of determining the concentration of trace elements to monitor the environmental safety of wastewater and natural waters that negatively impact the environment is highly relevant and scientific methods are

needed to reliably and accurately determine harmful pollutants. In this study, a method based on atomic emission analysis using a dual-jet plasmatron was developed to determine trace elements in Bishkek tap water and the medicinal natural salt “Chon-Tuz.” An optimal measurement mode in a dual-jet plasmatron was determined, taking into account the influence of arc current, working gas flow rate, and the influence of the main component of the liquid sample. Using the developed method, concentrations of manganese, cobalt, boron, and vanadium were determined in liquid samples. The results of a semi-quantitative analysis of the natural medicinal salt “Chon-Tuz” are also presented. The most rapid method for monitoring the environmental safety of wastewater and natural water is atomic emission spectroscopy, which meets most of the requirements for determining trace elements.

Keywords: plasmatron; plasma flow; trace elements; concentration; standard sample; analysis; concentration natural waters.

При оценке состояния окружающей среды необходимы надежные методы контроля экологических объектов, обеспечивающих жизнедеятельность человека. Известны микроэлементы, которые особенно негативно влияют на те или иные экологические объекты жизнеобеспечения. Прежде всего это тяжёлые металлы и их содержание, поскольку от уровня, степени их воздействия сегодня зависит состояние водоёмов, природной и питьевой воды, рекреационных ресурсов, лечебной соли и других экологических объектов жизнеобеспечения, в том числе используемых для лечебных целей. Проблема определения концентрации микроэлементов, отрицательно воздействующих на окружающую среду, на сегодня является весьма актуальной и необходимы научные методики надежно и достоверно определяющие вредные загрязнители.

Для контроля экологической безопасности сточных и природных вод наиболее экспрессным является метод атомно-эмиссионной спектроскопии, который отвечает большинству требований, предъявляемых к определению микроэлементов. В частности, методика прямого эмиссионного спектрального определения ряда микроэлементов в водах описана в работе [1]. Распространенным методом является вариант атомно-абсорбционного анализа с применением графитовых трубчатых печей в качестве атомизатора растворов [2, 3]. Авторами [4] разработан метод одновременного определения микроэлементов в природных водах, различной минерализации, основанной на анализе тонкого слоя веществ, на торце электрода.

Для высокоминерализованных вод разработан один из вариантов метода вращающегося диска, однако прямое определение элементов, содержащихся в воде очень малых концентраций весьма затруднительно, в связи с чем требуется предварительное концентрирование путем выпаривания, экстракции, ионного обмена или соосаждения и отделение определяемых элементов от других, особенно преобладающих по концентрации компонентов вод [5]. Без предварительного концентрирования определять широкий круг нормируемых микроэлементов на уровне ПДК позволяет применение индуктивно-связанной плазмы [6]. В настоящей работе для определения марганца, кобальта, бора, ванадия, свинца и фосфора в водопроводной воде г. Бишкека и исследования элементного состава лечебной природной соли «Чон-Туз» была разработана методика на базе атомно-эмиссионного анализа с использованием двухструйного плазматрона ДГП-100 [7].

Используемая методика включает подготовку пробы для анализа и механизм ее ввода в поток плазмы, подбор оптимальных условий измерения, анализ полученных результатов. Природную соль «Чон-Туз» доистирали на вибромельнице фирмы «Фрич» в течение 40 минут, при этом порошки имели крупность менее 20 мкм. Полученные порошки подавались в плазму дуги без разбавления с особо чистым графитовым порошком. С помощью аргона (расход ~ 1 л/мин) порошок вдувают в плазму двухструйного плазматрона [8], при силе тока – 80 А и расходе рабочего газа – 3 л/мин. Аналитическая зона потока плазмы расположена на расстоянии 25 мм от среза сопел плазматрона, экспозиция съемки составляет в зависимости от регистрируемой области спектра 20–45 сек. После съемки каждой пробы производят очистку системы подачи порошка путем вдувания чистого угольного порошка в течение 15–20 сек. На каждой фотопластинке снимают спектр железа, вдувая порошок Fe_2O_3, экспозиция съемки – 5–7 сек. Аналитические линии определяемых элементов и фон рядом с линией фотометрировали

на микроденситометре МД-100 и находили значения интенсивности спектральных линий исследуемых элементов.

Для проведения исследований жидких проб были приготовлены отдельные водные растворы указанных элементов из солей и окислов квалификации ХЧ (химически чистый) или ОСЧ (особо чистый). Из этих растворов готовили смешанный исходный раствор, содержащий 6 элементов (Co, B, Mn, V, Pb, P) с концентрацией от 4 до 200 мг/л в зависимости от чувствительности элементов. Перед проведением исследований отбирали 20 мл смешанного раствора, добавляли 1 мл кислоты (HCl) для предотвращения осаждения микроэлементов и разбавляли дистиллированной водой до 100 мл. Анализируемую жидкость вводили в плазму двухструйного плазматрона при помощи распылительной системы в виде мелкодисперсного аэрозоля. В распылительной системе использованы концентрический пневматический распылитель и перистальтический насос.

С целью выбора оптимальных условий для одновременного определения химических элементов в жидких пробах было исследовано влияние силы тока в дуге двухструйного плазматрона, расхода рабочего газа (аргон) на головках, расхода распыляющего газа, а также расхода анализируемых растворов на интенсивность аналитических линий и их распределение по высоте плазменного потока. Спектры фотографировались на спектрографе ДФС-13 с решеткой 1200 мм/шт. и шириной щели 0,02 мм, однолинзовой системой освещения (f = 150 мм). Использовались фотопластинки типа ЭС с чувствительностью 9 ед. ГОСТа.

Сила тока ДГП (дуговой генератор плазмы). Измерения показали, что интенсивность спектральных линий растет с увеличением силы тока в дуге плазматрона, но при силе тока 115 А рост интенсивности аналитических линий замедляется, тогда как интенсивность фона продолжает расти, вследствие чего максимумы соотношений линии и фона падают. Такая же картина наблюдается для всех исследуемых элементов. Поэтому в качестве оптимальной была выбрана рабочая сила тока I = 95–100 А. При этом также экспериментально установлено, что максимум отношения сигнал/шум при введении аэрозоля в плазму получается при углах между головками 115°.

Расход рабочего газа. При определенном взаимном расположении плазменных головок плазматрона и силе тока, мощность потока плазмы зависит от расхода рабочего газа на головках [9]. Расход газа менялся от 4 до 5,2 л/мин. Ток дуги – 100 А. Измерения показали, что максимумы интенсивности линий изучаемых элементов изменяются в зависимости от расхода газа и смещаются вдоль потока плазмы. Распределения интенсивности вдоль потока и смещение положения их максимумов для всех линий различны. Установлено, что при токах менее 80 А и расходе газа менее 4 л/мин с введением аэрозолей плазма гаснет. Поэтому наиболее оптимальным с аналитической точки зрения при анализе растворов является расход газа – 5 л/мин. Исследование распределения интенсивности линий в потоке плазмы при различных расходах газа позволяли выбрать оптимально-компромиссный участок струи, который находится на расстоянии 23–28 мм от среза сопел плазматрона.

Оптимизация расходов транспортирующего газа и анализируемой жидкости (воды) показали, что максимальная интенсивность всех эмиссионных линий анализируемых элементов достигается в области значений для газа – 1,4 л/мин и раствора – 4,3 мл/мин. Поэтому дальнейшие исследования проведены при силе тока – 100 А, расходе рабочего газа – 5 л/мин, распыляющего газа – 1,4 л/мин, водных растворов – 4,3 л/мин.

Устранение влияния основного компонента воды. При разработке научной методики спектрального анализа природных вод с использованием двухструйного плазматрона, особое внимание было уделено изысканию способов устранения влияния основного компонента воды на результаты определения, а также способов снижения пределов обнаружения определяемых микроэлементов. В этой связи до основного анализа водопроводных вод г. Бишкека были проведены исследования зависимости интенсивности линий выше указанных микропримесей от суммарной концентрации основных компонентов в пропорции, характерной для речных вод СССР – Ca : Mg : Na : K – 13: 5,3: 3,3: 1 [4].

Растворы готовили из смешанного исходного раствора с определенной концентрацией анализируемых элементов, добавлением необходимых количеств Ca, Mg, Na, K. Рост концентрации макрокомпонентов приводит к изменениям интенсивности спектральных линий микропримесей интенсивность линий ванадия, свинца в интервале концентрации от 0 до 1 г/л, бора, марганца и атомной линии кобальта до 5 г/л остается относительно постоянной, после чего резко увеличивается. Интенсивность линий фосфора и ионной линии кобальта растет незначительно в интервале 0–40 г/л. Как видится, для достижения лучшего предела обнаружения микропримесей в водопроводной воде с использованием двухструйного плазматрона следует проводить концентрирование воды частичными упариванием [10, 11].

Проведение анализа. Водопроводную воду 1 л из канализационной сети в г. Бишкеке в районе Национальной академии наук Кыргызской Республики при Президенте Кыргызской Республики после добавления 5 мл соляной кислоты упаривали в водяной бане до 100 мл воды, т. е. до 10-кратного концентрирования и хранили в 100 мл колбе. Стандартные образцы сравнения, содержащие определяемые элементы 0,05–200 мг/л, готовили добавлением аликвотной части исходного раствора к солевому раствору, содержащих 10 % суммарных компонентов Ca, Mg, Na и K, соответственно 5:3:1,5:0,5 %. Устанавливали pH таких растворов, равным (3–4), добавлением 0,1 м HCl.

Анализы проводились в оптимальном режиме работы двухструйного плазматрона (установленном выше), проектированием оптимального участка струи плазмы на щель спектрографа. Спектры анализируемой воды и синтетических растворов фотографируют дважды. После съемки каждой пробы производят очистку системы подачи жидкости путем промывки дистиллированной водой в течений 15–20 сек. Фотометрируют аналитические линии определяемых элементов и фон рядом с линией находят значения $\Delta S = S_{л+ф} - S_{ф}$, значение ΔS параллельных определений усредняют. По образцам сравнения строят градуировочный график в координатах ΔS-lgC и по нему находят содержание определяемых элементов [7].

Результаты количественного анализа питьевой воды г. Бишкека следующие: марганец – 0,0052 мг/л; кобальт – 0,011 мг/л; бор – 0,015 мг/л; ванадий – 0,025 мг/л; свинец и фосфор не обнаружены. Таким образом, данная методика может быть успешно использована для анализа различных вод с минерализацией меньше 40 г/л.

Точностные характеристики разработанной спектральной методики оценивают методом введено-найдено, что показано в таблице 1, из которой видно, что разработанная методика по своим метрологическим характеристикам соответствует III категории точности.

Таблица 1 – Правильность определения микроэлементов в водопроводной воде г. Бишкека

Определяемый элемент, аналит. лин., нм	Введено, $C_в$, мг/л	Найдено, $C_н$, мг/л	$\frac{(C_в - C_н)}{C_в} 100$	Интервал определяемых содержание элементов, мг/л
Mn II 257,6	0,5	0,415	17	0,005–5,0
Co I 340,5	2,5	2,1	16	0,010–10,0
Cr II 283,5	0,75	0,83	10,6	0,010–5,0
V II 292,4	2,5	2,0	20	0,010–5,0
Pb I 283,3	10	9,0	10	0,5–30,0
Ni I 341,4	0,24	0,22	8,3	0,8–100,0

Точностные характеристики разработанной спектральной методики оценивают методом «введено – найдено», что показано в таблице 1, из которой видно, что разработанная методика по своим метрологическим характеристикам соответствует III категории точности.

Из таблицы 2 видно, что в природной соли «Чоң-Туз» обнаружено присутствие 36 химических элементов. Следует отметить, что в таблице 2 отсутствует хлор, присутствие которого в соли не вызывает сомнения. Это связано с тем, что в аргоновой плазме, каким является двухструйный плазматрон, спектральные линии хлора не возбуждаются.

Таблица 2 – Результаты полуколичественного анализа лечебной природной соли «Чон-Туз»

№ п/п	Определяемый элемент	Содержание элемента, %	№ п/п	Определяемый элемент	Содержание элемента, %
1	Алюминий	10,0	19	Галлий	0,005
2	Железо	10,0	20	Молибден	0,005
3	Кремний	5–10,0	21	Медь	0,005
4	Кальций	3–5,0	22	Хром	0,003
5	Калий	2,0	23	Гафний	0,003
6	Стронций	0,5–1,0	24	Ниобий	0,003
7	Магний	0,3	25	Никель	0,003
8	Титан	0,1	26	Цинк	0,001
9	Церий	0,1	27	Свинец	0,001
10	Натрий	0,08	28	Скандий	0,001
11	Бор	0,03–0,3	29	Тантал	0,001
12	Фосфор	0,03	30	Кобальт	0,001
13	Марганец	0,02	31	Бериллий	0,0005
14	Барий	0,01–0,1	32	Цирконий	0,0003
15	Иттрий	0,01	33	Иттербий	0,0003
16	Лантан	0,01	34	Германий	0,0001
17	Ванадий	0,007	35	Олово	0,0001
18	Кадмий	0,007	36	Серебро	0,00001

Выводы.

1. Проведены оптимизации параметров двухструйного плазматрона (сила тока, угол слияния струй, расход плазмообразующего газа) а также расходов транспортирующего газа применительно к определению элементов в водном растворе.

2. Выбраны компромисно-оптимальные параметры указанных величин. Они состовляли: сила тока – 95–100 А; расход плазмообрзующего газа – 5 л/мин, угол слияние струй – 65^{o}; расход транспортирующего газа – 1,4 л/мин.

3. Разработана методика определения Mn, Co, Cr, V, Pb и Ni в водопроводной воде с минерализацией меньше 40 г/л.

4. Проведен количественный анализ питьевой воды г. Бишкека. Результаты анализа таковы:

- марганец – 0,0052 мг/л;
- кобальт – 0,011 мг/л;
- бор – 0,015 мг/л;
- ванадий – 0,025 мг/л;

- свинец и фосфор не обнаружены или ниже чувствительности методики.

5. Проведен полуколичественный анализ лечебной природной соли «Чоң-Туз» на присутствие 36 химических элементов.

Поступила: 15.06.2026; рецензирована: 29.06.2026; принята: 01.07.2026.

Литература

1. *Хитров В.Г.* Спектральный анализ высокоминерализованных природных вод на микроэлементы без предварительного концентрирования / В.Г. Хитров, Г.Е. Белоусова // Журнал аналитической химии. 1972. Т. 27. Вып. 7. С. 1357–1362.
2. *Хитров В.Г.* Атомно-абсорбционное определение тяжелых металлов в минеральных водах / В.Г. Хитров, Г.Е. Белоусова // Гидрохимические материалы. 1977. Т. 69. № 5. 215 с.
3. *Хитров В.Г.* Атомно-абсорбционное определение металлов-микроэлементов в природных и промышленных водах / В.Г. Хитров, Г.Е. Белоусова // Химия и технология воды. 1984. Т. 6. № 2. С. 152–154.
4. *Карякин А.В.* Влияние микрокомпонентов природных вод на определение микропримесей / А.В. Карякин, Л.И. Павленко, Н.С. Сафронова // Журнал аналитической химии. 1975. Т. 30. Вып. 4. С. 775–750.
5. *Брыкина Г.Д.* Определение продуктов коррозии конструкционного оборудования в водном теплоносителе электростанций / Г.Д. Брыкина, Г.А. Козырева, Л.В. Драчева [и др.] // Журнал аналитической химии. 1987. Т. 42.
6. *Сафронова Н.С.* Применение ИСП для определения микропримесей в природной воде / Н.С. Сафронова, Е.Н. Савинова // Тезисы докладов. I Всесоюзная конференция «Геохимия техногенезиса». Иркутск, 1985. Ч. 3. 151 с.
7. *Жеенбаев Ж.Ж.* Исследование дугового двухструйного плазматрона для анализа водных растворов / Ж.Ж. Жеенбаев, С. Рысбеков, А. Чылымов [и др.] // Тезисы докладов. III региональная конференция “Аналитика Сибири – 90”. Владивосток, 1990. С. 2–6.
8. *Чылымов А.* Двухструйный плазматрон – источник возбуждения спектров: монография / А. Чылымов. Бишкек, 2026. 159 с.
9. *Жеенбаев Н.Ж.* Определение температуры плазмы в переходной области двухструйных плазматорнов / Н.Ж. Жеенбаев, Г.Ж. Доржуева, А.М. Нурсеитова, Р.А. Таштанов // Физика НАН КР. 2016. № 1. С. 225–230.
10. *Жеенбаев Н.Ж.* Спектральный метод анализа природных вод Большого Чуйского канала / Н.Ж. Жеенбаев, Г.Ж. Доржуева // СИБОПТИКА – 2018. XIVМеждународная научная конференция. 2018. Т. 1. С. 156–162.
11. *Нурсеитова А.М.* Возможности повышения точности измерении в атомном-эмиссионном спектральном анализе / А.М. Нурсеитова // Вестник КРСУ. 2021. Т. 21. № 12. С. 19–24.