

Методы анализа и мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде

Альфия Р. Цыганкова^{1,2,3}, Сергей А. Гуляев^{1,2}, Любовь С. Адаменко⁴, Михаил А. Шестопалов^{1,4}

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр Фундаментальной и трансляционной медицины, НИИ Вирусологии, Новосибирск, Россия

Контактное лицо

Альфия Р. Цыганкова, к.х.н., с.н.с. ИНХ СО РАН, н.с. НИОХ СО РАН, доцент кафедры аналитической химии НГУ; 630090 Россия, Новосибирск, Пр. Ак. Лаврентьева 3.
Тел. +79130037744

Email alphiya@yandex.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>

Формат цитирования

Цыганкова А.Р., Гуляев С.А., Адаменко Л.С., Шестопалов М.А. Методы анализа и мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 131-146. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-12

Получена 16 января 2024 г.

Прошла рецензирование 14 февраля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Данный обзор посвящен современным инструментальным методам анализа, которые обеспечивают низкие пределы обнаружения для широкого списка элементов. Некоторые элементы имеют свои токсичные формы присутствия, определение которых имеет особую важность. Содержанию кадмия и свинца исследователи уделяют повышенное внимание, вследствие их высокой мгновенной и отложенной токсичности. Следует отметить, что те инструментальные методы анализа, которые применяют при определении этих важных экотоксикантов, зачастую, применяют и при определении других тяжелых металлов. Рассмотрены следующие объекты анализа – природные, речные, морские воды; рассолы; донные отложения; растения, в том числе лекарственные; осадки; почвы; а также цельная кровь и сыворотка крови; волосы и шерсть животных; органы и ткани животных. Рассмотрены и сравнены возможности современных инструментальных методов анализа при определении тяжелых металлов и важных экотоксикантов – одноэлементные (ЭТААС, ИВА и др.) и многоэлементные (АЭС ИСП, МС ИСП, РФА и др.). Данные структурированы в виде таблицы, где приведены конкретные методики анализа с указанием способа пробоподготовки и/или особенностей инструментального определения, список определяемых элементов и пределы обнаружения для них.

Отдельное внимание уделено устранению матричных влияний и снижению пределов обнаружения применением процедур концентрирования. Рассмотрены различные виды экстракции, сорбции, осаждения, химической трансформации (гидридогенерация и др.) применены для биологических объектов и объектов окружающей среды.

Ключевые слова

Тяжелые металлы, методы анализа, элементный анализ, пределы обнаружения.

Methods for analysis and monitoring of heavy metals in the environment

Alphiya R. Tsygankova^{1,2,3}, Sergey A. Gulyaev^{1,2}, Lyubov S. Adamenko⁴ and Michael A. Shestopalov^{1,4}

¹Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴Research Institute of Virology, Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Principal contact

Alphiya R. Tsygankova, Ph.D., Senior Researcher, Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (SB RAS) & Researcher, Research Institute of Organic Chemistry SB RAS, Associate Professor, Department of Analytical Chemistry, Novosibirsk State University; 3 Ak. Lavrentieva Ave, Novosibirsk, Russia 630090.

Tel. +79130037744

Email alpha@yandex.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>

How to cite this article

Tsygankova A.R., Gulyaev S.A., Adamenko L.S., Shestopalov M.A. Methods for analysis and monitoring of heavy metals in the environment. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):131-146. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-12

Received 16 January 2024

Revised 14 February 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

This review surveys capabilities of modern instrumental analytical methods that provide low limits of detection for a wide range of elements. Some elements have their own toxic forms, so their identification is of particular importance. Researchers pay increased attention to the content of cadmium and lead due to their high immediate and delayed toxicity.

It should be noted that those instrumental methods of analysis that are used to determine these important ecotoxins are often used to determine other heavy metals. The following objects of analysis are considered – natural, river, sea waters; brines; bottom sediments; plants, including medicinal ones; precipitation; soil; as well as whole blood and blood serum; hair and animal fur; animal organs and tissues. Special attention is paid to eliminating matrix influences and reducing limits of detection using concentration procedures. Various types of extraction, sorption, precipitation, chemical transformation (hydride generation, etc.) are considered and applied to biological and environmental objects.

The capabilities of modern instrumental methods of analysis for the determination of heavy metals and important ecotoxins are considered and compared – single-element (ETAAS, IVA, etc.) and multi-element (ICP AES, ICP MS, XRF, etc.). The data is structured in the form of a table, which shows specific analysis methods, indicating the method of sample preparation and/or features of instrumental determination, a list of elements to be determined and the limits of detection.

Key Words

Heavy metals, methods of analysis, elemental analysis, limits of detection.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие инструментальных методов аналитической химии внесло существенный вклад в общее развитие фундаментальной и прикладной науки. Сложно выделить область исследований, где использование инструментальных методов не определило направление и/или глубину научного поиска. Интенсификация научного прогресса стимулирует и совершенствует промышленное, сельскохозяйственное, пищевое, фармакологическое и другие виды производств. В настоящее время большое внимание уделяется уровню качества жизни человека, а угроза благосостоянию и здоровью человека является одной из самых актуальных проблем. Следует отметить, что загрязнение окружающей среды, в самом широком смысле этого понятия, это один из важнейших факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество жизни населения. Одним из инструментов, который позволяет оценить уровень неблагоприятного воздействия является определение химических соединений, в частности присутствие потенциально опасных элементов – тяжёлых металлов [1]. Под термином «тяжёлые металлы» следует понимать атомы металлов и некоторых металлоидов, обладающих высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции. Иногда эту группу элементов называю «экоотоксиканты». К таковым можно отнести достаточно большой список элементов – до 40 элементов с молярной массой более 50 ат.ед. Очевидно, влияние этих элементов носит разный характер, различаются мгновенная и отсроченная токсичность, биоаккумуляция и отложенные эффекты.

Данный обзор посвящен современным инструментальным методам анализа, которые обеспечивают низкие пределы обнаружения для широкого списка элементов. Некоторые элементы имеют свои токсичные формы присутствия, определение которых имеет особую важность. В обзоре будет уделено внимание определению некоторых из них. Содержанию кадмия и свинца исследователи уделяют повышенное внимание, вследствие их высокой токсичности, оказывающей влияние как на состояние живого организма здесь и сейчас, так и на возможность размножения в будущем. Следует отметить, что те инструментальные методы анализа, которые применяют при определении этих важных экоотоксикантов, зачастую, применяют и при определении других тяжёлых металлов. Поэтому в настоящем обзоре мы ограничимся данными о кадмии и свинце.

Загрязнение окружающей среды кадмием, свинцом и их соединениями – признанная мировая проблема [2–5]. Основная причина этого явления постоянный рост антропогенного воздействия [6; 7]. Нормативный документ, действующий на территории РФ, относит эти металлы ко 2 классу опасности – «высоко опасные вещества» [8]. К основным источникам загрязнений можно отнести выбросы промышленных предприятий [1], бытовые и с/х отходы [9], транспорт [10]. При попадании в живой организм кадмий и свинец способны вызывать серьезные патологические изменения, по этой причине, определение этих экоотоксикантов является актуальной задачей сегодняшнего дня.

ОБСУЖДЕНИЕ

В обзоре уделено внимание различным объектам окружающей среды – природные, речные, морские воды; рессолы; донные отложения; растения, в том числе лекарственные; осадки; почвы; а также биологическим объектам, состав которых также может указывать на экологическую обстановку – цельная кровь и сыворотка крови; волосы и шерсть животных; органы и ткани животных.

Предварительная пробоподготовка

Особое место в анализе биологических проб и объектов окружающей среды при определении тяжелых металлов занимает пробоподготовка. В идеальном случае, в процессе пробоподготовки определяемый компонент максимально изолируют от сложного состава матрицы пробы. Как правило, наиболее важным этапом пробоподготовки является извлечение определяемых элементов из исследуемого материала и перевод в анализируемый раствор [11]. При этом для некоторых типов гомогенных жидких сред возможен вариант прямого определения, однако, невзирая на наличие и способ предварительной пробоподготовки анализируемый раствор должен удовлетворять следующим требованиям:

- отсутствие твердых или взвешенных частиц;
- минимальное влияние матричного компонента пробы;
- уровень содержания должен соответствовать диапазону определяемых концентраций методики количественного химического анализа.

Наиболее распространённым вариантом перевода проб в анализируемый раствор является кислотная минерализация с использованием концентрированных неорганических кислот и окислителей (HNO_3 , HClO_4 , H_2O_2) [12–16]. Для ряда биологических проб в целях оптимизации элементометрии применяют термическое озоление. Известно, что при температуре выше 450 °C органическая составляющая основы пробы полностью разлагается [17; 18]. Термическое озоление может быть основой для получения растворимого зольного остатка, который при последующей минерализации полностью переводят в анализируемый раствор [19]. Кроме того, озоление может быть основным и/или единственным способом трансформации органической составляющей основы пробы. При этом используют инструментальные методы, позволяющие проводить анализ порошковых проб [20; 21]. Такой подход упрощает процедуру растворения, однако увеличивает вероятность потери определяемых компонентов в летучей форме [22]. Альтернативой для разложения в открытых системах и термическому озолению является минерализация в аналитических автоклавах. Преимуществом такого подхода является возможность контролируемого нагрева в замкнутой системе, что препятствует загрязнению раствора распространёнными примесями из атмосферы воздуха и потери аналитов. Материал аналитических автоклавов инертен к воздействию большинства неорганических кислот. Нагрев таких автоклавов выполняют либо в резистивном [23], либо микроволновом режиме [24]. Причём последний вариант позволяет сократить время разложения за счёт интенсификации процесса разложения в поле микроволнового излучения. Сегодня на рынке существуют как иностранные [25; 26], так и

отечественные производители [27; 28], предлагающие микроволновые печи различных конструкций. Простота и эффективность использования микроволновых систем разложения проб обуславливают их широкое использование для подготовки объектов различной природы.

Концентрирование – это эффективный приём для снижения матричного влияния, увеличения концентрации определяемого элемента, а, следовательно, и снижения предела его обнаружения. Содержание тяжёлых металлов в объектах окружающей среды находятся на низком уровне концентраций, поэтому применение методов концентрирования часто необходимая часть пробоподготовки. Среди методов концентрирования тяжёлых металлов встречаются сорбция с использованием сорбентов разного состава [29–33]; жидкостно-жидкостная экстракция [34–36]; осаждение и соосаждение [37; 38]; генерация химических паров [39; 40].

Атомно-абсорбционная спектрометрия

Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) используется во многих лабораториях, особенно при необходимости определения элементов, находящихся в следовых количествах. Зачастую определение тяжёлых металлов в биологических объектах и объектах окружающей среды сводится к определению именно низких содержаний ограниченного круга аналитов. Благодаря инструментальным возможностям ААС можно варьировать условия регистрации аналитического сигнала для каждого элемента по-отдельности и, таким образом, выбирать наилучшие условия для достижения минимальных пределов обнаружения. Различают ААС с пламенной и электротермической (ЭТ) атомизацией в графитовой кювете. В целом, для метода ЭТААС пределы обнаружения более низкие по сравнению с пламенным вариантом, что объясняется температурой источника атомизации [41].

При ЭТААС определении тяжёлых металлов в биологических материалах и объектах окружающей среды возникают несколько проблем, в основном из-за неполного распыления, а также высокий фоновый уровень и накопление углеродистых остатков внутри распылителя. Недоразложившиеся остатки проб приводят к невоспроизводимому сигналу из-за переменной скорости распыления и даже частичному перекрытию луча света. Этих недостатков можно избежать, включив кислородный или воздушный этап озоления в цикле нагрева. Однако это предполагает уменьшения срока службы пиролитического материала графитовых кювет. Избежать накопления остатков внутри распылителя можно добавлением кислот окислителей непосредственно в кювету совместно с анализируемым раствором. Другим способом является включение в программу нагрева шага озоления [42].

Метод ЭТААС успешно применён для определения тяжёлых металлов в растениях [43–45]; в морских водах [46; 47]; в объектах сельского хозяйства [48; 49]; в биологических пробах [50; 51]. Наряду со стандартным ЭТААС существует альтернативный способ атомизации – двухстадийная зондовая атомизация. Такой подход позволяет устранить часть матричных помех и проводить прямой анализ без кислотной минерализации или с минимальной пробоподготовкой [52–54].

Электрохимические методы

Среди электрохимических методов анализа, связанных с использованием электролитических ячеек, можно найти примеры наиболее точных и чувствительных определений металлов в объектах различной природы. Как и в случае ААС электрохимические методы используют в одноэлементном варианте. Природа электроактивного вещества определяет потенциал окисления или восстановления, поэтому селективность электрохимических методов может быть повышена правильным выбором потенциала электрода. Методы анализа весьма специфичны, часто отсутствует необходимость предварительного разделения компонентов, поэтому методы характеризуются высокой экспрессностью. Среди электрохимических методов можно выделить инверсионную вольтамперометрию (ИВА), которая показала высокие аналитические характеристики при определении тяжёлых металлов в природных объектах [55–57]; в растительном сырье [58–60]; в биологических пробах [61–65]. Подавляющее большинство опубликованных работ – это одноэлементные определения аналитов в специально выбранных условиях, что и обеспечивает наилучшие условия определения. В литературе также описана возможность селективного инверсионно вольтамперометрического одновременного определения нескольких элементов, что позволяет проводить многоэлементный анализ [66–69].

Многоэлементные спектральные методы

Наиболее интенсивно используемые методы элементного анализа на сегодняшний день – это атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) и масс-спектрометрия (МС) с различными источниками возбуждения спектров и ионов. Методы являются многоэлементными, хотя в литературе встречаются примеры их использования для определения отдельных примесей [70–72]. Подавляющее большинство работ, в которых использованы эти методы относятся к спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП). Это обусловлено рядом причин – многоэлементность, высокие метрологические характеристики, коммерческая доступность приборов высокого класса и образцов сравнения разных составов. ИСП – универсальный источник возбуждения эмиссионных спектров и генерации ионов, характеризующийся высокой робастностью, низкими погрешностями определения аналитического сигнала как в условиях повторяемости, так и воспроизводимости [73–75]. ИСП это источник, который используют в первую очередь для анализа растворов. Абсолютная величина аналитического сигнала и его вариация будут зависеть от характеристик водного аэрозоля, поступающего в ИСП. Для создания высококачественного аэрозоля используют пневматические распылители разной конструкции [76].

Матричные эффекты в методах АЭС и МС с ИСП обусловлены различием размера капель аэрозоля образцов сравнения и анализируемых проб; процессами транспорта аэрозоля в плазму; изменением термических свойств плазмы при распылении образцов сравнения и анализируемых проб, а также через спектральные или изобарные наложения [77]. Все эти факторы приводят к повышению пределов обнаружения определяемых элементов. Так, например, в работах [43; 78–80]

описано прямое инструментальное определение тяжёлых металлов методом АЭС ИСП; в работах [81–83] – прямое определение методом МС ИСП. Эти работы связывает единый подход при анализе – кислотное разложение проб различного состава и их последующий анализ с применением стандартных подходов – водные образцы сравнения, последовательное разбавление проб, внутренний стандарт для коррекции возможных неспектральных влияний.

Альтернативой ИСП выступают дуга постоянного тока (ДПТ) и двухструйный дуговой плазмотрон (ДДП). Эти источники объединяет возможность анализа порошкообразных твердых образцов без перевода в раствор, что существенно сокращает время анализа и упрощает его процедуру. Порошкообразной основой, т.е. спектральным буфером для разбавления проб часто выступает высококачественный графитовый порошок, который благодаря своей инертности и малому числу собственных спектральных линий широко используют при анализе объектов различной природы. ДПТ применяли для определения широкого списка элементов в биологических пробах [21; 84; 85], в объектах окружающей среды [86; 87], в медицинских пробах [88; 89].

ДДП обладает более широкими аналитическими возможностями по сравнению с ДПТ, так как обладает более высокой мощностью, что позволяет вводить в плазму большее количество пробы, а, следовательно, обеспечивать более низкие пределы обнаружения. В цикле работ [20; 90; 91] описаны методики определения токсичных и эссенциальных элементов в органах животных, волосах и растениях.

Применение методов концентрирования позволяет устранить большую часть матричных влияний, это положительно сказывается как на параметрах плазмы, так и на метрологических характеристиках. В работах [92–94] для извлечения определяемых элементов применяли дисперсионную микро-экстракцию на твердых частицах; жидкостно-жидкостную экстракцию [95–97]; сорбцию [98–100] и другие методы концентрирования [101–103].

Другие многоэлементные методы

Существуют и другие инструментальные методы анализа, дающие количественную оценку присутствующих в образце элементов. К их числу относят рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Метод позволяет проводить неразрушающий анализ как твердых, так и жидких образцов. Самые низкие пределы обнаружения возможно достигнуть при определении тяжелых (по атомной массе) элементов в лёгких матрицах. Метод РФА используют для анализа горных пород, донных осадков, для экологического мониторинга различных экосистем [104–106].

Использование синхротронного излучения (СИ) для возбуждения рентгеновской флуоресценции РФА СИ позволяет существенно улучшить возможности метода РФА. СИ обладает рядом уникальных свойств – высокая яркость, малая расходимость пучка, линейная поляризация [107]. Всё это позволяет успешно применять метод РФА СИ для исследования сложных биологических [108; 109], геологических объектов [110; 111] и объектов окружающей среды [112; 113].

В эпоху развития ядерной физики появились различные методы, основанные на радиоактивности. Среди них можно выделить группу методов, основанной на радиоактивации, в том числе активации нейтронами – нейтронно-активационный анализ (НАА). Достоинствами активационного анализа являются высокая, иногда даже рекордная чувствительность. Предел обнаружения некоторых элементов достигает 10^{-11} % мас. Активационный анализ активно используют при анализе объектов различной природы [114–116].

Формы присутствия элементов

Токсичность элементов зависит от химической формы элемента, в которой он присутствует в рассматриваемой системе [117]. Понимание того, что химическая форма элемента определяет свойства, оказало значительное влияние на развитие токсикологии, медицинской химии, геохимии и химии окружающей среды. Новые разработки в области аналитического оборудования и методологии проведения измерений позволяют идентифицировать и количественно определять формы элемента, присутствующие в исследуемой системе [118]. С этой целью применяют «гибридные методы», т.е. методы химического анализа, основанные на сочетании разделения компонентов анализируемой пробы и определения (детектирования) разделенных компонентов. В настоящее время гибридные методы анализа являются основным инструментом при решении задач, связанных с идентификацией форм элементов, что во многом обусловлено возможностью использования чувствительных и селективных детекторов, достоинства которых могут быть полностью реализованы при состыковке с высокоэффективными системами разделения. В качестве методов разделения чаще всего используют высокоэффективную жидкостную хроматографию, капиллярный электрофорез и газовую хроматографию. Например, в работах [119–122] использованы гибридные методы для идентификации и количественного определения форм присутствия кадмия в воде и растениях. Следует отметить, что в виду сложности проблематики число работ, посвященных изучению форм связывания элементов в объектах окружающей среды, ограничено. Наиболее информативным методом идентификации форм элементов в растительных образцах является масс-спектрометрия с ионизацией электрораспылением, но отнесение масс-спектров представляется затруднительным из-за отсутствия соответствующих стандартов, поэтому авторы нередко ограничивают рамки исследований соединениями, для которых эти стандарты доступны [123; 124].

В таблице приведены конкретные методики анализа с указанием способа пробоподготовки или особенностей инструментального определения, список определяемых элементов и пределы обнаружения для них. Предпочтение было отдано публикациям, в которых наиболее полностью продемонстрированы возможности инструментальных методов; где описаны наилучшие метрологические характеристики, а также приведены оригинальные подходы в процессе пробоподготовки.

Таблица. Методы инструментального определения тяжелых металлов в биологических и объектах окружающей среды**Table.** Instrumental methods determination of heavy metals in biological and environmental objects

Ссылка Reference	Метод анализа Method of analysis	Объект Object	Пределы обнаружения Limits of detection	Особенности Special conditions
42	ЭТААС ETAAS	Моча, сыворотка, кровь Urine, serum, blood	Pb 13 нг/пг Cd 0,8 нг/пг	Разбавление тритоном X-100 и дигидрофосфатом аммония. Калибровка методом стандартных добавок Dilution with Triton X-100 and ammonium dihydrogen phosphate. Calibration using standard addition method
43	ЭТААС ETAAS АЭС ИСП ICP OES	Лекарственные травы Medicinal herbs	Al, Cr, Fe, V 0,05–0,3 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd, Co, Pb 0,008–0,15 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Разложение смесью кислот HNO ₃ , HClO ₄ и HF Acids decomposition by mixtures of HNO ₃ , HClO ₄ , HF
45	ЭТААС ETAAS МС ИСП ICP MS	Лекарственные травы Medicinal herbs	As, Cd, Pb 0,01–0,2 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ As, Cd, Pb 0,008–0,01 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Ионообменная хроматография Ion exchange chromatography
46	ЭТААС ETAAS	Почвы, донные отложения, морская вода Soils, bottom sediments, sea water	Cd, Cu, Pb 0,08–0,83 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Микроволновое разложение в смеси HNO ₃ , HCl и HF Microwave acids decomposition by mixtures of HNO ₃ , HClO ₄ , HF
47	ЭТААС ETAAS	Морская вода Sea water	Pb 0,008 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,005 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Концентрирование на оксиде графена Fe ₃ O ₄ @graphene Concentration on graphene oxide Fe ₃ O ₄ @graphene
48	ЭТААС ETAAS	Сельскохозяйственные культуры Agricultural crops	Pb 0,18 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,02 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Концентрирование на сорбенте в УЗ поле Concentration on a sorbent in an ultrasonic field
50	ЭТААС ETAAS	Вода, кровь Water, blood	Pb 0,023 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Твердофазная экстракция Solid phase extraction
51	ЭТААС ETAAS	Кровь Blood	Cd, Co, Cr, Pb 0,2–25 нг·г ⁻¹ / ng·l ⁻¹	Кислотное разложение, модификаторы Acid decomposition, modifiers
52	ДЗА ААС TPA ETAAS	Цельное молоко, сливки, смесь для детского питания Whole milk, cream, baby formula	Pb 0,5 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,04 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без разложения, двухстадийная зондовая атомизация No decomposition, two-stage probe atomization
53	ДЗА ААС TPA ETAAS	Почвы Soils	Au, Cd, Pb, Se 0,002–10 мкг·кг ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без разложения, двухстадийная зондовая атомизация No decomposition, two-stage probe atomization
57	ИВА Stripping voltamperometry	Вода Water	Cd 105 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без применения ртути No mercury
59	ИВА Stripping voltamperometry	Лекарственные травы Medicinal herbs	Pb 0,12 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹ Cd 0,010 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹	Сухое озоление проб. С использованием подвесного ртутного капельного электрода Dry ashing of samples. Using a suspended mercury drop electrode
60	Анодная вольтамперометрия Anodic voltammetry	Сигаретные фильтры, пепел, табак	Cd, Cu, Pb 0,72–43 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition

Cigarette filters, ash, tobacco				
64	ИВА Stripping voltamperometry	Кровь Blood	Cd 0,0004 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Ультразвук в сочетании с озонированием Ultrasound combined with ozonation
66	ИВА Stripping voltamperometry	Вода Water	Cu(II), Pb(II), Cd(II), Zn(II), Ag(I), Hg(II) 10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶ М	Одновременный многоэлементный анализ Simultaneous multi-element analysis
68	Анодная вольтамперометрия Anodic voltammetry	Цельнозерновая, пшеничная и кукурузная мука Whole grain, wheat and corn flour	Cr, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn < 0,123 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Одновременный многоэлементный анализ Simultaneous multi-element analysis
78	АЭС ИСП ICP OES	Растения Herbs	Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn 0,07–1,8 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition
79	АЭС ИСП ICP OES	Рассолы Pickles	Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn 0,1–2,1 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Внутренний стандарт Internal standard
80	АЭС ИСП ICP OES	Речная вода, морская вода River water, sea water	Co, Cu, Mn, Fe, V, Ti, Mn 0,02–0,6 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Экстракция трёхфазным реагентом Extraction with a three-phase reagent
81	ИСП МС высокого разрешения High resolution ICP MS	Моча Urine	Cd, Cu, Pb, Zn 1,4–111 нг·г ⁻¹ / pg·g ⁻¹	Внутренний стандарт Internal standard
82	МС ИСП двойной фокусировки MS ISP dual focus	Моча, почка, речная вода, лишайники, донные отложения Urine, kidney, river water, lichens, sediments	Cd 10 нг·г ⁻¹ / pg·g ⁻¹	Изотопное разбавление Isotope dilution
83	МС ИСП ICP MS	Рис Rice	As, Cd, Pb 0.20–0.40 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition
21	АЭС ДПТ DCA OES АЭС ДДП TJ OES	Волосы Hair	Ag, Al, Bi, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Si, Ti, Zn 0,01–0,8 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹ Al, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, W, Zn 0,06–2 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Обжиг, разбавление графитовым буфером Firing, dilution with graphite buffer
89	АЭС ДПТ DCA OES	Сыворотка крови Serum	Ca, Cu, Fe, Mg, P, Zn 30–2000 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без пробоподготовки Without sample preparation
20	АЭС ДДП TJ OES	Органы животных Animal organs	Al, B, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, P, Si, Ti, Zn 0,10–30 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Обжиг лиофилизированных тканей Firing of lyophilized fabrics

Примечание: пределы обнаружения представлены в единицах измерения, как приведено в литературном источнике
 Note: limits of detection are presented in units of measurement as given in the literature

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сохранение безопасности окружающей среды и поддержание высокого уровня жизни населения – важная задача сегодняшнего дня. Возможности современных инструментальных методов анализа при

определении тяжелых металлов и важных экотоксикантов во многом зависят от самого объекта анализа. Очевидно, что применение многоэлементных методов даёт наиболее полную картину экологической обстановки, однако часто условия регистрации

нескольких десятков определяемых элементов носит компромиссный характер, что оказывает негативное влияние на их метрологические характеристики. Устранение матричных влияний и снижение пределов обнаружения достигнуто применением процедур концентрирования. Различные виды экстракции, сорбции, осаждения, химической трансформации (гидридогенерация и др.) применены для биологических объектов и объектов окружающей среды. Использование одноэлементных методов позволяет создать уникальные условия для отдельно взятого элемента, что в сочетании с предварительным концентрированием может обеспечивать низкие пределы обнаружения.

Методы ЭТААС, АЭС ИСП, МС ИСП в различных вариантах хорошо зарекомендовали себя при определении кадмия, свинца и других тяжёлых металлов в объектах различной природы. Пределы обнаружения кадмия могут достигать 0,005–0,08 мкг·л⁻¹ для ЭТААС; 0,0004–105 мкг·л⁻¹ для ИВА; 0,008–0,1 мкг·л⁻¹ для АЭС ИСП; и рекордные 1,4 пг·г⁻¹ для МС ИСП высокого разрешения. Пределы обнаружения свинца могут достигать 0,008–0,83 мкг·л⁻¹ для ЭТААС; 0,12–43 мкг·л⁻¹ для ИВА; 0,15–2,1 мкг·л⁻¹ для АЭС ИСП; 0,01 мкг·л⁻¹ для МС ИСП. Интересно, что при оценке экологического состояния возможность многоэлементных методов часто остаются не реализованными; методами АЭС ИСП и МС ИСП одновременно проводят определение не более 30 элементов, хотя потенциально методами определяют до 60–70 элементов.

Роль инструментальных методов для получения достоверной информации об элементном и вещественном составе биологических объектов и объектов окружающей среды неоспорима. Современные методики количественного химического анализа обеспечивают получение надежных результатов определения тяжелых металлов, однако в условиях постоянной изменчивости и появлении новых объектов исследований требуется адаптация имеющихся или разработка принципиально новых методик, что является актуальной, но сложной аналитической задачей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121031700315-2.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 121031700315-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. 2013. N 1(23). С. 182–192.
2. Flora G., Gupta D., Tiwari A. Toxicity of lead: a review with recent updates // Interdisciplinary toxicology. 2012. V. 5. N 2. P. 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
3. Papanikolaou N.C., et al. Lead toxicity update. A brief review // Medical science monitor. 2005. V. 11. N 10. P. RA329–RA336.
4. Seregin I.V., Ivanov V.B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants // Russian journal of plant

- physiology. 2001. T. 48. С. 523–544. <https://doi.org/10.1023/A:1016719901147>
5. Genchi G., et al. The effects of cadmium toxicity // International journal of environmental research and public health. 2020. V. 17. N 11. Article ID: 3782. <https://doi.org/10.3390%2Fijerph17113782>
6. Amin B., et al. Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia // Environmental monitoring and assessment. 2009. V. 148. P. 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0159-z>
7. Jigau G., et al. Heavy metals in the anthropogenic cycle of elements // Soil as World Heritage. 2014. P. 61–68. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6187-2_9
8. Онищенко Г.Г. СанПин 2.1. 4.1074–01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. 2002.
9. Воскресенская О.Л., Воскресенский В.С., Алябьева Е.А. Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов // Современные проблемы науки и образования. 2013. N 2. С. 401–401.
10. Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2005. N 4. С. 36–43.
11. Уланова Т.С. и др. Научно-методические основы химико-аналитического обеспечения медико-биологических исследований в экологии человека // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2009. N 4. С. 16–21.
12. Perring L., et al. An evaluation of analytical techniques for determination of lead, cadmium, chromium, and mercury in food-packaging materials // Fresenius' journal of analytical chemistry. 2001. V. 370. P. 76–81. <https://doi.org/10.1007/s002160100716>
13. Bingöl M., et al. Determination of some heavy metal levels in soft drinks from Turkey using ICP-OES method // Czech journal of food sciences. 2010. T. 28. N 3. P. 213–216. <http://dx.doi.org/10.17221/158/2008-CJFS>
14. Wippermann D., et al. Determination of technology-critical elements in seafood reference materials by inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2023. P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-023-05081-z>
15. Shang D., et al. Direct determination of lead in foods by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry // Analytical Sciences. 2016. V. 32. N 9. P. 1007–1010. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.1007>
16. Melo J.C., et al. Sequential determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, and Zn in powdered refreshments by FS-F AAS after a simple sample treatment // Food Analytical Methods. 2020. V. 13. P. 212–221. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12161-019-01589-2>
17. Бок Р., Трофимова В.А. Методы разложения в аналитической химии. М.: Химия, 1984. 432 с.
18. Онищенко Г.Г. Контроль содержания химических соединений и элементов в биологических средах. Пермь: Книжный формат, 2011. 520 с.
19. Определение массовой концентрации марганца, свинца, магния в пробах крови методом атомно-абсорбционной спектроскопии: МУК 4.1.2106-06 / Т.С. Уланова [и др.] // Определение вредных веществ в биологических средах: сб. метод. указаний. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 62 с.
20. Zaksas N.P., Sultangazieva T.T., Korda T.M. Using a two-jet arc plasmatron for determining the trace element composition of powdered biological samples // Journal of Analytical

- Chemistry. 2006. V. 61. P. 582–587.
<https://doi.org/10.1134/S1061934806060128>
21. Tsygankova A.R., et al. Analysis of trace elements in the hair of farm animals by atomic emission spectrometry with DC ARC excitation sources // *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2017. V. 9. N 5. P. 601.
22. Титова Е.Ф., Титов В.А., Трунов А.А., Коковин Г.А., Чернявский Л.И., Кузнецов Ф.А. Банк данных по свойствам материалов электронной техники. Опыт создания автоматизированной базы термодинамической информации. Препринт 90–16. Новосибирск: СО АН СССР, 1990. с. 44.
23. Хвостиков В.А., Карандашев В.К., Орлова В.А. Автоклавная система вскрытия образцов для элементного анализа. Патент РФ. N RU 2599526. 2016.
24. Кубракова И.В. Микроволновое излучение в аналитической химии: возможности и перспективы использования // *Успехи химии*. 2002. Т. 71. N 4. С. 327–340.
25. Микроволновые системы серии Master. URL: <https://labconcept.ru/catalog/sample-preparation/mikrovolnovye-sistemy-razlozheniya/master/> (дата обращения: 01.03.2024)
26. Система микроволнового разложения проб MARS 6. URL: <https://interanalyt.ru/shop/mikrovolnovaya-podgotovka-prob/kislotnoe-razlozhenie-mineralizatsiya/mars-6/> (дата обращения: 01.03.2024)
27. Шипков А.Г. Способ подготовки проб для химического анализа и устройство для его осуществления. Патент РФ, N RU2165608. 2000.
28. Микроволновая система пробоподготовки ПЛП-01М МЕРКУРИЙ для минерализации. URL: https://www.moslabo.ru/production/prob/pp_svch/mikrovolnovaya-laboratornaya-sistema-pech-dlya-probopodgotovki-merkuriy-plp-01m/ (дата обращения: 01.03.2024)
29. Васильева Л.А. и др. Определение свинца и кадмия в моче атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией // *Журнал аналитической химии*. 2008. Т. 63. N 7. С. 711–716.
30. Маркова М.Е. и др. Сорбция тяжелых металлов высшими грибами и хитином разного происхождения в опытах in vitro // *Вестник нижегородского университета им. Лобачевского* Н.И. 2008. N 6. С. 118–124.
31. Паршина А.Э. и др. Сорбция кадмия, свинца и хрома (vi) целлюлозными комплексами арктических бурых водорослей // *Химия растительного сырья*. 2022. N 3. С. 325–336.
32. Папуниди К.Х. и др. Сорбционные характеристики высокодисперсных минеральных адсорбентов в отношении кадмия, свинца и т-2-токсина // *Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2012. N 1. С. 97.
33. Fernández F.M., et al. Fully automatic on-line separation preconcentration system for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of cadmium and lead in sea-water // *Analyst*. 1997. V. 122. N 7. P. 679–684.
<https://doi.org/10.1039/a607598c>
34. Burguera J.L., Burguera M. On-line sample pre-treatment systems interfaced to electrothermal atomic absorption spectrometry // *Analyst*. 1998. V. 123. N 4. P. 561–569.
<https://doi.org/10.1039/D3AN02164E>
35. Anthemidis A.N., Zachariadis G.A., Stratis J.A. Development of an on-line solvent extraction system for electrothermal atomic absorption spectrometry utilizing a new gravitational phase separator. Determination of cadmium in natural waters and urine samples // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2003. V. 18. N 11. P. 1400–1403.
<https://doi.org/10.1039/B308325J>
36. Tao G., Fang Z. On-line flow injection solvent extraction for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of nickel in biological samples // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 1995. V. 50. N 14. P. 1747–1755.
[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(95\)01378-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01378-4)
37. Yebra M.C., Enriquez M.F., Cespón R.M. Preconcentration and flame atomic absorption spectrometry determination of cadmium in mussels by an on-line continuous precipitation–dissolution flow system // *Talanta*. 2000. V. 52. N 4. P. 631–636.
[https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00367-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00367-2)
38. Wang Y., Wang J. H., Fang Z.L. Octadecyl immobilized surface for precipitate collection with a renewable microcolumn in a lab-on-valve coupled to an electrothermal atomic absorption spectrometer for ultratrace cadmium determination // *Analytical chemistry*. 2005. V. 77. N 16. P. 5396–5401.
<https://doi.org/10.1021/ac050638z>
39. Vargas-Razo C., Tyson J.F. Determination of cadmium by flow injection-chemical vapor generation-atomic absorption spectrometry. // *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 2000. N 366. P. 182–190. <https://doi.org/10.1007/s002160050036>
40. Lampugnani L., Salvetti C., Tsalev D.L. Hydride generation atomic absorption spectrometry with different flow systems and in-atomizer trapping for determination of cadmium in water and urine—overview of existing data on cadmium vapour generation and evaluation of critical parameters // *Talanta*. 2003. V. 61. N 5. P. 683–698. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00324-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00324-2)
41. Seiler H., Sigel A., Sigel H. Atomic absorption spectrometry. Handbook on metals in clinical and analytical chemistry. CRC Press, 1994. 940 p.
42. Campillo N., et al. Rapid determination of lead and cadmium in biological fluids by electrothermal atomic absorption spectrometry using Zeeman correction // *Analytica chimica acta*. 1999. V. 390. N 1–3. P. 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00166-X)
43. Gomez M.R., et al. Determination of heavy metals for the quality control in argentinian herbal medicines by ETAAS and ICP-OES // *Food and Chemical Toxicology*. 2007. V. 45. N 6. P. 1060–1064. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.013>
44. Брянский Б.Я., Лосева А.А., Князев С.Ю. Определение цинка, кадмия, свинца в системе "почва-дождевые черви-кресс-салат" методом ЭТААС // *Естественные науки и экология*. 2019. С. 11–15.
45. Arpadjan S., et al. Arsenic, cadmium and lead in medicinal herbs and their fractionation // *Food and chemical toxicology*. 2008. V. 46. N 8. P. 2871–2875.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.05.027>
46. Acar O. Determination of cadmium, copper and lead in soils, sediments and sea water samples by ETAAS using a Sc+Pd+NH₄NO₃ chemical modifier // *Talanta*. 2005. V. 65. N 3. P. 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.035>
47. Montoro-Leal P., et al. Magnetic dispersive solid phase extraction for simultaneous enrichment of cadmium and lead in environmental water samples // *Microchemical Journal*. 2020. V. 155. Article ID: 104796.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104796>
48. Behbahani M., et al. Ultrasonic-assisted d-μ-SPE based on amine-functionalized KCC-1 for trace detection of lead and cadmium ion by GFAAS // *Microchemical Journal*. 2022. V. 183. Article ID: 107951.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107951>
49. Angeleska A., et al. Determination of heavy metals and radionuclides in animal feeds of plant origin. Proceedings 3rd International Conference on Agriculture and Life Science. Campobasso-Tirana, 2021. pp. 464–465
50. Rezazadeh N., et al. Novel Graphene oxide-Polyethylene Glycol mono-4-nonylphenyl Ether adsorbent for solid phase extraction of Pb²⁺ in blood and water samples // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2022. V. 20. N 2. P. 675–689. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00807-0>
51. Daftsis E.J., Zachariadis G.A. Analytical performance of ETAAS method for Cd, Co, Cr and Pb determination in blood fractions samples // *Talanta*. 2007. V. 71. N 2. P. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.029>
52. Захаров Ю.А. и др. Прямое атомно-абсорбционное определение свинца и кадмия в питьевых молочных

- продуктах с помощью двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи // Аналитика и контроль. 2013. Т. 3. N 3. С. 275–280.
<https://journals.ufu.ru/index.php/analitika/article/view/801>
53. Захаров Ю.А. и др. Прямой атомно-абсорбционный анализ почв с помощью приставки Атзонд-1 для двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. N 2. С. 159–169.
<https://journals.ufu.ru/index.php/analitika/article/view/759>
54. Volzhenin A.V., et al. Determination of gold and palladium in rocks and ores by atomic absorption spectrometry using two-stage probe atomization // Journal of Analytical Chemistry. 2017. V. 72. P. 156–162. <https://doi.org/10.1134/S1061934817020150>
55. Трубачева Л.В., Купцова Н.В. Определение содержания подвижных форм тяжёлых металлов (кадмия, свинца и меди) в почвах методом инверсионной вольтамперометрии // Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия. 2008. N 2. С. 112–118.
56. Темерев С.В., Логинова О.Б. Экстракционно-вольтамперометрический способ определения цинка, кадмия, свинца и меди в природных водах. Патент РФ, номер патента: RU 2383014. 2010.
57. Rajawat D.S., Kumar N., Satsangee S.P. Trace determination of cadmium in water using anodic stripping voltammetry at a carbon paste electrode modified with coconut shell powder // Journal of Analytical Science and Technology. 2014. V. 5. P. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40543-014-0019-0>
58. Матвейко Н.П. и др. Инверсионно-вольтамперометрический контроль содержания тяжелых металлов в лекарственном растительном сырье и препаратах на его основе // Вестник витебского государственного технологического университета. 2016. Т. 1. N 30. С. 82–89.
59. Mamani M.C.V., et al. Simultaneous determination of cadmium and lead in medicinal plants by anodic stripping voltammetry // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2005. V. 37. N 4. P. 709–713. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.11.049>
60. Lisboa T.P., et al. Simultaneous determination of cadmium, lead, and copper in the constituent parts of the illegal cigarettes by Square Wave Anodic Stripping Voltammetry // Microchemical Journal. 2019. V. 150. Article ID: 104183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2019.104183>
61. Захарчук Н.Ф. и др. Прямое определение кадмия, свинца и меди в цельной крови методом инверсионной вольтамперометрии с использованием модифицированных толстопленочных графитовых электродов // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Т. 11. N 5. С. 725–737.
62. Алексеева Н.А. и др. Определение содержания кадмия, меди, свинца и цинка в биообъектах методом инверсионной вольтамперометрии // Клиническая лабораторная диагностика. 2004. N 9. С. 83а–83.
63. Селимов Р.Н. Накопление свинца и кадмия в организме лошадей и поиск метода их выведения // Ветеринарная практика. 2008. N 3. С. 97–99.
64. Kruusma J., et al. Sono-electroanalysis: anodic stripping voltammetric determination of cadmium in whole human blood // Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis. 2004. V. 16. N 5. P. 399–403. <http://dx.doi.org/10.1002/elan.200302834>
65. Kumar M.P., et al. Differential pulse anodic stripping voltammetric determination of Pb, Cd, Cu, and Zn in air, diet, and blood samples: Exposure assessment // Analytical letters. 2005. V. 38. N 3. P. 463–475. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-200047792>
66. Каменев А.И. и др. Многоэлементный анализ в инверсионной вольтамперометрии // Журнал аналитической химии. 2008. Т. 63. N 11. С. 1186–1192. <https://doi.org/10.1134/S0044450219010079>
67. Barek J., et al. Polarography and voltammetry at mercury electrodes // Critical reviews in analytical chemistry. 2001. V. 31. N 4. P. 291–309. <http://dx.doi.org/10.1080/20014091076776>
68. Locatelli C., Torsi G. Simultaneous square wave anodic stripping voltammetric determination of Cr, Pb, Sn, Sb, Cu, Zn in presence of reciprocal interference: application to meal matrices // Microchemical Journal. 2004. V. 78. N 2. P. 175–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2004.04.003>
69. Suteerapataranon S., et al. Exploiting flow injection and sequential injection anodic stripping voltammetric systems for simultaneous determination of some metals // Talanta. 2002. V. 58. N 6. P. 1235–1242. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00445-9](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00445-9)
70. Tsygankova A.R., et al. Determination of boron by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. Biodistribution of ^{10}B in tumor-bearing mice // Russian Chemical Bulletin. 2020. V. 69. P. 601–607. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2805-8>
71. Szymczycha-Madeja W.M.A., Pohl P. Determination and speciation of inorganic As in homeopathic medicines by HG-ICP OES method with no or minimal sample treatment before measurements // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2023. N 236. Article ID: 115682. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.115682>
72. Stürup St. Application of HR-ICP-MS for the simultaneous measurement of zinc isotope ratios and total zinc content in human samples // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2000. V. 15. N 4. P. 315–321. <https://doi.org/10.1039/A906207F>
73. Чудинов Э.Г. Атомно-эмиссионный анализ с индукционной плазмой // Итоги науки и техники. Серия: аналитическая химия. 1990. Т. 2. 255 с.
74. Dean J.R. Practical inductively coupled plasma spectrometry. John Wiley & Sons, 2019. 220 p.
75. Nölte J. ICP Emission Spectrometry: a practical guide. John Wiley & Sons, 2021. 281 p.
76. Суриков В.Т. Пневматические распылители с пересекающимися потоками для спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2010. N 3. С. 108–156.
77. Todolí J.L., et al. Elemental matrix effects in ICP-AES // Journal of analytical atomic spectrometry. 2002. V. 17. N 2. P. 142–169. <https://doi.org/10.1039/B009570M>
78. Kos V., et al. Determination of heavy metal concentrations in plants exposed to different degrees of pollution using ICP-AES // Fresenius' journal of analytical chemistry. 1996. V. 354. P. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s0021663540648>
79. Mitko K., Bebek M. ICP-OES determination of trace elements in salinated water samples // Atomic spectroscopy-norwalk Connecticut. 1999. V. 20. N 6. P. 217–223.
80. Li X.J., et al. Determination of trace metal ions Co, Cu, Mo, Mn, Fe, Ti, V in reference river water and reference seawater samples by inductively coupled plasma emission spectrometry combined with the third phase preconcentration // Fresenius' journal of analytical chemistry. 1996. V. 356. P. 52–56. <https://doi.org/10.1007/s0021663560052>
81. Townsend A.T., et al. The determination of copper, zinc, cadmium and lead in urine by high resolution ICP-MS // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 1998. V. 13. N 11. P. 1213–1219. <https://doi.org/10.1039/A805021J>
82. Mota J.P.V., et al. Determination of cadmium in environmental and biological reference materials using isotope dilution analysis with a double focusing ICP-MS: a comparison with quadrupole ICP-MS // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 1999. V. 14. N 9. pp. 1467–1473. <https://doi.org/10.1039/A901753D>
83. Mataveli L.R.V., et al. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS // Journal of Analytical Methods in Chemistry. 2016. V. 2016. Article ID: 3968786 <https://doi.org/10.1155/2016/3968786>

84. Cholak J., Hubbart D.M. Determination of Cadmium in Biological Material. Spectrographic, Polarographic, and Colorimetric Methods // *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. 1944. V. 16. N 5. P. 333–336. <http://dx.doi.org/10.1021/i560129a024>
85. Bharti A.S., Sharma S., Uttam K.N. Elemental assessment of the leaf and seed of *Rauwolfia serpentina* (Sarpagandha) by direct current arc optical emission spectroscopy // *National Academy Science Letters*. 2020. V. 43. P. 361–365. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-019-00872-4>
86. Ma W., et al. Volatilization and leaching behavior of heavy metals in MSW incineration fly ash in a DC arc plasma furnace // *Fuel*. 2017. V. 210. P. 145–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.091>
87. Shukla N. Trace Metal Analysis of Red Tomato by Direct Current Arc Optical Emission Spectroscopy // *Indian J. Sci. Res*. 2019. V. 18. N 2. P. 01–05.
88. Polyakova E.V., Shuvaeva O.V. Determination of Calcium, Magnesium, Iron, Copper, Zinc, and Phosphorus in Blood Serum by Arc Atomic Emission Spectrometry // *Journal of Analytical Chemistry*. 2005. V. 60. N 10. P. 937–941. <http://dx.doi.org/10.1007/s10809-005-0212-9>
89. Гладких Э.А. и др. Применение атомно-эмиссионной спектрометрии с возбуждением спектров в дуге постоянного тока для оценки средних уровней содержания макро-и микроэлементов в волосах человека // *Микроэлементы в медицине*. 2003. Т. 4. N 3. С. 20–24.
90. Закас Н.П. Возможности двухструйного дугового плазмотрона для атомно-эмиссионного спектрального анализа высокочистых веществ и биологических проб // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. N 1–2. С. 34–38.
91. Закас Н.П., Веряскин А.Ф. Двухструйная дуговая плазма: матричные влияния и способы их подавления // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. N 1(II). С. 139–144.
92. Bozorgzadeh E., Pasdaran A., Ebrahimi-Najafabadi H. Determination of toxic heavy metals in fish samples using dispersive micro solid phase extraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy // *Food Chemistry*. 2021. V. 346. Article ID: 128916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128916>
93. Nyaba L., et al. Speciation of inorganic selenium in environmental samples after suspended dispersive solid phase microextraction combined with inductively coupled plasma spectrometric determination // *Talanta*. 2016. V. 159. P. 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.06.023>
94. Nyaba L., Matong J.M., Nomngongo P.N. Nanoparticles consisting of magnetite and Al_2O_3 for ligandless ultrasound-assisted dispersive solid phase microextraction of Sb, Mo and V prior to their determination by ICP-OES // *Microchimica Acta*. 2016. V. 183. P. 1289–1297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-016-1766-y>
95. Ranjbar L., et al. Ionic liquid based dispersive liquid-liquid microextraction combined with ICP-OES for the determination of trace quantities of cobalt, copper, manganese, nickel and zinc in environmental water samples // *Microchimica Acta*. 2012. V. 177. P. 119–127. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-011-0757-2>
96. Lemos V.A., dos Santos Vieira E.V. Method for the determination of cadmium, lead, nickel, cobalt and copper in seafood after dispersive liquid-liquid micro-extraction // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014. V. 31. N 11. P. 1872–1878. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.964338>
97. Dos Santos Silva E., et al. Dispersive liquid-liquid microextraction for simultaneous determination of cadmium, cobalt, lead and nickel in water samples by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Microchimica Acta*. 2012. V. 178. P. 269–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-012-0836-z>
98. Castro G.R., et al. Determination of Cd (II), Cu (II) and Ni (II) in aqueous samples by ICP-OES after on-line preconcentration in column packed with silica modified with 2-aminothiazole // *Microchimica Acta*. 2008. V. 160. P. 203–209. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-007-0845-5>
99. Zougagh M., de Torres A.G., Pavón J.M. C. Determination of cadmium in water by ICP-AES with on-line adsorption preconcentration using DPTH-gel and TS-gel microcolumns // *Talanta*. 2002. V. 56. N 4. P. 753–761. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(01\)00605-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(01)00605-1)
100. Ferreira S.L.C., et al. Copper determination in natural water samples by using FAAS after preconcentration onto amberlite XAD-2 loaded with calmagite // *Talanta*. 2000. V. 50. N 6. P. 1253–1259. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00230-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00230-1)
101. Bloxham, Martin J. The determination of trace metals in sea water using ICP-MS. Diss. University of Plymouth, 1994.
102. Kilbride C., Poole J., Hutchings T.R.A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses // *Environmental Pollution*. 2006. V. 143. N 1. P. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.013>
103. Bakircioglu D., Kurtulus Y.B., Yurtsever S. Comparison of extraction induced by emulsion breaking, ultrasonic extraction and wet digestion procedures for determination of metals in edible oil samples in Turkey using ICP-OES // *Food chemistry*. 2013. V. 138. N 2–3. P. 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.089>
104. Демаков Ю.П. и др. Использование рентгенофлуоресцентного анализа для оценки содержания химических элементов в почве лесных биогеоценозов // *Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага»*. 2017. N 8. С. 56–75.
105. Умаров Н.Н. Исследования содержания тяжелых металлов в почве и растениях каперса колючего (*Capparis spinosa* L.) и полыни горкой (*Artemisia absinthium* L.) методом рентгенофлуоресцентного анализа // *Экосистемы*. 2022. N 29. С. 43–50.
106. Чернова Р.К. и др. Определение содержания свинца в почвах г. Саратова методом рентгенофлуоресцентного анализа // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология*. 2013. Т. 13. N 3. С. 108–113.
107. Трунова В.А., Зверева В.В. Метод рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения: объекты исследования // *Журнал структурной химии*. 2016. Т. 57. N 7. С. 1401–1407. <http://dx.doi.org/10.15372/JSC20160705>
108. Trunova V.A., Zvereva V.V. Investigation of insoluble endogenous fractions of gastrointestinal tract by SRXRF // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. V. 543. N 1. P. 266–270. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nima.2005.01.238>
109. Trunova V.A., Brenner N.V., Zvereva V.V. Investigation of the content and of the distribution of chemical elements in human nails by SRXRF // *Toxicology Mechanisms and Methods*. 2009. V. 19. N 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/15376510801891310>
110. Fedotov A.P., et al. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments // *Environmental earth sciences*. 2015. V. 73. P. 7297–7314. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3906-1>
111. Stepanova O.G., et al. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments // *Environmental earth sciences*. 2015. V. 74. P. 2029–2040. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4457-9>

112. Степанова О.Г. и др. Исследования донных осадков прогляциального озера Эхой (Восточный Саян) методом РФА-СИ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. N 1. С. 132–132. <http://dx.doi.org/10.7868/S0367676515010317>
113. Сиромля Т.И., Худяев С.А., Сысо А.И. Использование метода РФА-СИ в почвенно-экологических исследованиях на территории г. Новосибирска // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. N 1. С. 101–101. <https://doi.org/10.7868/S0367676515010287>
114. Кулматов Р.А., Кист А.А., Каримов И.И. Нейтронно-активационная оценка распределения элементов в водах // Журнал аналитической химии. 1980. Т. 35. N 2. С. 254–259.
115. Музафаров А.М. и др. Методы оценки техногенного влияния хвостохранилищ промышленных предприятий на окружающую среду // Горный вестник Узбекистана. 2002. N 2. С. 85–89.
116. Музафаров А.М., Кулматов Р.А. Многоэлементный анализ химических элементов в пробах почвы с помощью инструментального нейтронно-активационного метода // Universum: технические науки. 2020. Т. 12–3. N 81. С. 100–104.
117. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection // Analytica chimica acta. 2008. V. 621. Iss. 2. P. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.05.034>
118. Kot A., Namiesnik J. The role of speciation in analytical chemistry // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2000. V. 19. N 2–3. P. 69–79. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00195-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00195-8)
119. Shuvaeva O.V., Belchenko L.A., Romanova T.E. Studies on cadmium accumulation by some selected floating macrophytes // International journal of phytoremediation. 2013. V. 15. N 10. P. 979–990. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751353>
120. Romanova T.E., Shuvaeva O.V., Belchenko L.A. The mesocosm study of cadmium and copper bioaccumulation by water hyacinth in one-time and sequentially contaminated system // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2015. V. 95. N 13. P. 1186–1194. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2014.1002490>
121. Fujita M. The presence of two Cd-binding components in the roots of water hyacinth cultivated in a Cd²⁺-containing medium // Plant and cell physiology. 1985. V. 26. N 2. P. 295–300.
122. Sadi B.B.M., et al. An HPLC-ICP-MS technique for determination of cadmium–phytochelatins in genetically modified *Arabidopsis thaliana* // Journal of Chromatography B. 2008. V. 861. N 1. P. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2007.11.004>
123. Yen T.Y., Villa J.A., DeWitt J.G. Analysis of phytochelatin–cadmium complexes from plant tissue culture using nano-electrospray ionization tandem mass spectrometry and capillary liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry // Journal of mass spectrometry. 1999. V. 34. N 9. P. 930–941. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9888\(199909\)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9888(199909)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e)
124. Barańkiewicz D., et al. Determination of cadmium and lead species and phytochelatins in pea (*Pisum sativum*) by HPLC-ICP-MS and HPLC-ESI-MSn // Talanta. 2009. V. 79. N 2. P. 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.04.026>
3. Papanikolaou N.C., et al. Lead toxicity update. A brief review. *Medical science monitor*, 2005, vol. 11, no. 10, pp. RA329–RA336.
4. Seregin I.V., Ivanov V.B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian journal of plant physiology*, 2001, vol. 48, pp. 523–544. <https://doi.org/10.1023/A:1016719901147>
5. Genchi G., et al. The effects of cadmium toxicity. *International journal of environmental research and public health*, 2020, vol. 17, no. 11, article id: 3782. <https://doi.org/10.3390%2FIjerph17113782>
6. Amin B., et al. Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia. *Environmental monitoring and assessment*, 2009. vol. 148. pp. 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0159-z>
7. Jigau G., et al. Heavy metals in the anthropogenic cycle of elements. *Soil as World Heritage*, 2014, pp. 61–68. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6187-2_9
8. Onishchenko G.G. SanPin 2.1. 4.1074–01 Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia Publ., 2002.
9. Voskresenskaya O.L., Voskresensky V.S., Alyabysheva E.A. Accumulation of heavy metals by soil and plants in places of collection and temporary storage of solid household waste. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 2, pp. 401–401. (In Russian)
10. Plyaskina O.V., Ladonin D.V. Compounds of heavy metals in granulometric fractions of some types of soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye* [Bulletin of Moscow University. Episode 17. Soil Science]. 2005, no. 4, pp. 36–43. (In Russian)
11. Ulanova T.S., et al. Scientific and methodological foundations of chemical and analytical support for medical and biological research in human ecology. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra* [Bulletin of the Perm Federal Research Center]. 2009, no. 4, pp. 16–21. (In Russian)
12. Perring L., et al. An evaluation of analytical techniques for determination of lead, cadmium, chromium, and mercury in food-packaging materials. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 2001, vol. 370, pp. 76–81. <https://doi.org/10.1007/s002160100716>
13. Bingöl M., et al. Determination of some heavy metal levels in soft drinks from Turkey using ICP-OES method. *Czech journal of food sciences*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 213–216. <http://dx.doi.org/10.17221/158/2008-CJFS>
14. Wippermann D., et al. Determination of technology-critical elements in seafood reference materials by inductively coupled plasma–tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2023, pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-023-05081-z>
15. Shang D., et al. Direct determination of lead in foods by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry. *Analytical Sciences*, 2016, vol. 32, no. 9, pp. 1007–1010. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.1007>
16. Melo J. C. et al. Sequential determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, and Zn in powdered refreshments by FS-F AAS after a simple sample treatment. *Food Analytical Methods*, 2020, vol. 13, pp. 212–221. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12161-019-01589-2>
17. Bok R., Trofimova V.A. *Metody razlozheniya v analiticheskoy khimii* [Decomposition methods in analytical chemistry]. Moscow, Chemistry, 1984, 432 p. (In Russian)
18. Onishchenko G.G. *Kontrol' soderzhaniya khimicheskikh soyedineniy i elementov v biologicheskikh sredakh* [Control of the content of chemical compounds and elements in biological environments]. Perm, Knizhnyi format Publ., 2011, 520 c. (In Russian)

REFERENCES

1. Teplaya G.A. Heavy metals as a factor in environmental pollution (literature review). *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin of Environmental Education]. 2013, no.1(23), pp. 182–192.
2. Flora G., Gupta D., Tiwari A. Toxicity of lead: a review with recent updates. *Interdisciplinary toxicology*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>

19. Ulanova T.S., et al. Determination of the mass concentration of manganese, lead, magnesium in blood samples by atomic absorption spectrometry MUK 4.1.2106-06. *Opredele niye vrednykh veshchestv v biologicheskikh sredakh: sb. metod. ukazanii* [Determination of harmful substances in biological environments: collection of articles. method. instructions]. Moscow, 2008, 62 p. (In Russian)
20. Zaksas N.P., Sultangazieva T.T., Korda T.M. Using a two-jet arc plasmatron for determining the trace element composition of powdered biological samples. *Journal of Analytical Chemistry*, 2006, vol. 61, pp. 582–587. <https://doi.org/10.1134/S1061934806060128>
21. Tsygankova A.R., et al. Analysis of trace elements in the hair of farm animals by atomic emission spectrometry with DC ARC excitation sources. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2017, vol. 9, no. 5, p. 601.
22. Titova E.F., Titov V.A., Trunov A.A., Kokovin G.A., Chernyavsky L.I., Kuznetsov F.A. *Bank dannykh po svoistvam materialov elektronnoi tekhniki. Opyt sozdaniya avtomatizirovannoy bazy termodinamicheskoy informatsii* [Data bank on the properties of materials for electronic equipment. Experience in creating an automated thermodynamic information database]. Preprint 90–16. Novosibirsk, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990, 44 p. (In Russian)
23. Khvostikov V.A., Karandashev V.K., Orlova V.A. *Avtoklavnyaya sistema vskrytiya obraztsov dlya elementnogo analiza* [Autoclave system for opening samples for elemental analysis]. Patent RF, no. RU 2599526, 2016.
24. Kubrakova I.V. Microwave radiation in analytical chemistry: possibilities and prospects for use. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry]. 2002, vol. 71, no. 4, pp. 327–340. (In Russian)
25. *Mikrovolnovyye sistemy serii Master* [Microwave systems Master series]. Available at: <https://labconcept.ru/catalog/sample-preparation/mikrovolnovye-sistemy-razlozheniya/master/> (accessed 01.03.2024)
26. *Sistema mikrovolnovogo razlozheniya prob MARS 6* [Microwave sample digestion system MARS 6]. Available at: <https://interanalyt.ru/shop/mikrovolnovaya-podgotovka-prob/kislotnoe-razlozhenie-mineralizatsiya/mars-6/> (accessed 01.03.2024)
27. Shipkov A.G. *Sposob podgotovki prob dlya khimicheskogo analiza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Possibility of sample preparation for chemical analysis and devices for its implementation]. Patent RF, no. RU2165608. 2000.
28. *Mikrovolnovaya sistema probopodgotovki PLP-01M MERKURIY dlya mineralizatsii* [Microwave sample preparation system PLP-01M MERCURY for mineralization]. Available at: https://www.moslabo.ru/production/prob/pp_svch/mikrovolnovaya-laboratornaya-sistema-pech-dlya-probopodgotovki-merkuriy-plp-01m/ (accessed 01.03.2024)
29. Vasilyeva L.A., et al. Determination of lead and cadmium in urine by the atomic absorption method with electrothermal atomization. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry]. 2008, vol. 63, no. 7, pp. 711–716. (In Russian)
30. Markova M.E., et al. Sorption of heavy metals by higher fungi and chitin of various origins in in vitro experiments. *Vestnik nizhegorodskogo universiteta im. Lobachevskogo N.I.* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after Lobachevsky N.I.]. 2008, no. 6, pp. 118–124. (In Russian)
31. Parshina A.E., et al. Sorption of cadmium, lead and chromium (vi) by cellulose complexes of Arctic brown algae. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials]. 2022, no. 3, pp. 325–336. (In Russian)
32. Papunidi K.Kh., et al. Sorption characteristics of highly dispersed mineral adsorbents with respect to cadmium, lead and t-2-toxin. *Problemy veterinarnoi sanitarii, gigiyeny i ekologii* [Problems of veterinary sanitation, hygiene and ecology]. 2012, no. 1, p. 97. (In Russian)
33. Fernández F.M., et al. Fully automatic on-line separation preconcentration system for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of cadmium and lead in sea-water. *Analyst*, 1997, vol. 122, no. 7, pp. 679–684. <https://doi.org/10.1039/a607598c>
34. Burguera J.L., Burguera M. On-line sample pre-treatment systems interfaced to electrothermal atomic absorption spectrometry. *Analyst*, 1998, vol. 123, no. 4, pp. 561–569. <https://doi.org/10.1039/D3AN02164E>
35. Anthemidis A.N., Zachariadis G.A., Stratis J.A. Development of an on-line solvent extraction system for electrothermal atomic absorption spectrometry utilizing a new gravitational phase separator. Determination of cadmium in natural waters and urine samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, vol. 18, no. 11, pp. 1400–1403. <https://doi.org/10.1039/B308325J>
36. Tao G., Fang Z. On-line flow injection solvent extraction for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of nickel in biological samples // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1995, vol. 50, no. 14, pp. 1747–1755. [https://doi.org/10.1016/0584-8547\(95\)01378-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01378-4)
37. Yebra M.C., Enriquez M.F., Cespon R.M. Preconcentration and flame atomic absorption spectrometry determination of cadmium in mussels by an on-line continuous precipitation–dissolution flow system. *Talanta*, 2000, vol. 52, no. 4, pp. 631–636. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00367-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00367-2)
38. Wang Y., Wang J.H., Fang Z.L. Octadecyl immobilized surface for precipitate collection with a renewable microcolumn in a lab-on-valve coupled to an electrothermal atomic absorption spectrometer for ultratrace cadmium determination. *Analytical chemistry*, 2005, vol. 77, no. 16, pp. 5396–5401. <https://doi.org/10.1021/ac050638z>
39. Vargas-Razo C., Tyson J.F. Determination of cadmium by flow injection-chemical vapor generation-atomic absorption spectrometry. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2000, no. 366, pp. 182–190. <https://doi.org/10.1007/s002160050036>
40. Lampugnani L., Salvetti C., Tsalev D.L. Hydride generation atomic absorption spectrometry with different flow systems and in-atomizer trapping for determination of cadmium in water and urine overview of existing data on cadmium vapour generation and evaluation of critical parameters. *Talanta*, 2003, vol. 61, no. 5, pp. 683–698. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00324-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00324-2)
41. Seiler H., Sigel A., Sigel H. Atomic absorption spectrometry. Handbook on metals in clinical and analytical chemistry. CRC Press Publ., 1994, 940 p.
42. Campillo N., et al. Rapid determination of lead and cadmium in biological fluids by electrothermal atomic absorption spectrometry using Zeeman correction. *Analytica chimica acta*, 1999, vol. 390, no. 1–3, pp. 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00166-X)
43. Gomez M.R., et al. Determination of heavy metals for the quality control in argentinian herbal medicines by ETAAS and ICP-OES. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, vol. 45, no. 6, pp. 1060–1064. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.013>
44. Bryanskii B.Ya., Loseva A.A., Knyazev S.Yu. Determination of zinc, cadmium, lead in the “soil-earthworms-cress” system by the ETAAS method. *Yestestvennyye nauki i ekologiya* [Natural Sciences and Ecology]. 2019, pp. 11–15. (In Russian)
45. Arpadjan S., et al. Arsenic, cadmium and lead in medicinal herbs and their fractionation. *Food and chemical toxicology*, 2008, vol. 46, no. 8, pp. 2871–2875. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.05.027>
46. Acar O. Determination of cadmium, copper and lead in soils, sediments and sea water samples by ETAAS using a Sc+Pd+NH₄NO₃ chemical modifier. *Talanta*, 2005, vol. 65, no. 3, pp. 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.035>
47. Montoro-Leal P., et al. Magnetic dispersive solid phase extraction for simultaneous enrichment of cadmium and lead in environmental water samples. *Microchemical Journal*. 2020, vol.

- 155, article id: 104796.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104796>
48. Behbahani M., et al. Ultrasonic-assisted d-μ-SPE based on amine-functionalized KCC-1 for trace detection of lead and cadmium ion by GFAAS. *Microchemical Journal*, 2022, vol. 183, pp. 107951. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107951>
49. Angeleska A., et al. Determination of heavy metals and radionuclides in animal feeds of plant origin. Proceedings 3rd International Conference on Agriculture and Life Science. Campobasso-Tirana, 2021, pp. 464–465.
50. Rezazadeh N., et al. Novel Graphene oxide-Polyethylene Glycol mono-4-nonylphenyl Ether adsorbent for solid phase extraction of Pb²⁺ in blood and water samples. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 675–689. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00807-0>
51. Daftsis E.J., Zachariadis G.A. Analytical performance of ETAAS method for Cd, Co, Cr and Pb determination in blood fractions samples. *Talanta*, 2007, vol. 71, no. 2, pp. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.029>
52. Zakharov Yu.A., et al. Direct atomic absorption determination of lead and cadmium in drinking dairy products using two-stage probe atomization in a graphite furnace. *Analytics and control*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 275–280. (In Russian)
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/801>
53. Zakharov Yu.A., et al. Direct atomic absorption analysis of soils using the Atzond-1 attachment for two-stage probe atomization in a graphite furnace. *Analytics and control*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 159–169. (In Russian)
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/759>
54. Volzhenin A.V., et al. Determination of gold and palladium in rocks and ores by atomic absorption spectrometry using two-stage probe atomization. *Journal of Analytical Chemistry*, 2017, vol. 72, pp. 156–162.
<https://doi.org/10.1134/S1061934817020150>
55. Trubacheva L.V., Kuptsova N.V. Determination of the content of mobile forms of heavy metals (cadmium, lead and copper) in soils by stripping voltammetry. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Fizika i khimiya* [Bulletin of the Udmurt University. Physics and Chemistry Series]. 2008, no. 2, pp. 112–118. (In Russian)
56. Temerev S.V., Loginova O B. *Ekstraktsionno-voltamperometricheskii sposob opredeleniya tsinka, kadmiya, svintsya i medi v prirodnykh vodakh*. [Extraction-voltammetric method for determining zinc, cadmium, lead and copper in natural waters]. RF patent, no. RU 2383014, 2010.
57. Rajawat D.S., Kumar N., Satsangee S.P. Trace determination of cadmium in water using anodic stripping voltammetry at a carbon paste electrode modified with coconut shell powder. *Journal of Analytical Science and Technology*, 2014, vol. 5, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40543-014-0019-0>
58. Matveiko N.P., et al. Stripping voltammetric control of the content of heavy metals in medicinal plant raw materials and preparations based on them. *Vestnik vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Vitebsk State Technological University]. 2016, vol. 1, no. 30, pp. 82–89. (In Russian)
59. Mamani M.C.V., et al. Simultaneous determination of cadmium and lead in medicinal plants by anodic stripping voltammetry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2005, vol. 37, no. 4, pp. 709–713.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.11.049>
60. Lisboa T.P., et al. Simultaneous determination of cadmium, lead, and copper in the constituent parts of the illegal cigarettes by Square Wave Anodic Stripping Voltammetry. *Microchemical Journal*, 2019, vol. 150, article id: 104183.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2019.104183>
61. Zakharchuk N.F., et al. Direct determination of cadmium, lead and copper in whole blood by stripping voltammetry using modified thick-film graphite electrodes. *Khimiya v interesakh* ustoichivogo razvitiya [Chemistry for sustainable development]. 2003, vol. 11, no. 5, pp. 725–737. (In Russian)
62. Alekseeva N.A., et al. Determination of the content of cadmium, copper, lead and zinc in biological objects by stripping voltammetry. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika* [Clinical laboratory diagnostics]. 2004, no. 9, pp. 83a–83. (In Russian)
63. Selimov R.N. Accumulation of lead and cadmium in the body of horses and the search for a method for their removal. *Veterinarnaya praktika* [Veterinary practice]. 2008, no. 3, pp. 97–99. (In Russian)
64. Kruusma J., et al. Sono-electroanalysis: anodic stripping voltammetric determination of cadmium in whole human blood. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 2004, vol. 16, no. 5, pp. 399–403.
<http://dx.doi.org/10.1002/elan.200302834>
65. Kumar M.P., et al. Differential pulse anodic stripping voltammetric determination of Pb, Cd, Cu, and Zn in air, diet, and blood samples: Exposure assessment. *Analytical letters*, 2005, vol. 38, no. 3, pp. 463–475. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-200047792>
66. Kamenev A.I., et al. Multielement analysis in stripping voltammetry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63, no. 11, pp. 1186–1192. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0044450219010079>
67. Barek J., et al. Polarography and voltammetry at mercury electrodes. *Critical reviews in analytical chemistry*, 2001, vol. 31, no. 4, pp. 291–309. <http://dx.doi.org/10.1080/20014091076776>
68. Locatelli C., Torsi G. Simultaneous square wave anodic stripping voltammetric determination of Cr, Pb, Sn, Sb, Cu, Zn in presence of reciprocal interference: application to meal matrices. *Microchemical Journal*, 2004, vol. 78, no. 2, pp. 175–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2004.04.003>
69. Suteerapataranon S., et al. Exploiting flow injection and sequential injection anodic stripping voltammetric systems for simultaneous determination of some metals. *Talanta*, 2002, vol. 58, no. 6, pp. 1235–1242. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00445-9](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00445-9)
70. Tsygankova A.R., et al. Determination of boron by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. Biodistribution of ¹⁰B in tumor-bearing mice. *Russian Chemical Bulletin*, 2020, vol. 69, pp. 601–607.
<https://doi.org/10.1007/s11172-020-2805-8>
71. Szymczycha-Madeja W.M.A., Pohl P. Determination and speciation of inorganic As in homeopathic medicines by HG-ICP OES method with no or minimal sample treatment before measurements. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2023, no. 236, article id: 115682.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.115682>
72. Stürup St. Application of HR-ICP-MS for the simultaneous measurement of zinc isotope ratios and total zinc content in human samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2000, vol. 15, no. 4, pp. 315–321.
<https://doi.org/10.1039/A906207F>
73. Chudinov E.G. Atomno-emissionnyy analiz s induktsionnoy plazmoy. *Itogi nauka i tekhniki* [Atomic emission analysis with induction plasma. Results of science and technology]. Series: analytical chemistry. 1990, vol. 2, 255 p.
74. Dean J.R. Practical inductively coupled plasma spectrometry. John Wiley & Sons Publ., 2019, 220 p.
75. Nölte J. ICP Emission Spectrometry: a practical guide. John Wiley & Sons Publ., 2021, 281 p.
76. Surikov V.T. Pneumatic sprayers with intersecting flows for inductively coupled plasma spectrometry. *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. 2010, no. 3, pp. 108–156. (In Russian)
77. Todolí J.L., et al. Elemental matrix effects in ICP-AES. *Journal of analytical atomic spectrometry*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 142–169. <https://doi.org/10.1039/B009570M>
78. Kos V., et al. Determination of heavy metal concentrations in plants exposed to different degrees of pollution using ICP-AES.

- Fresenius' journal of analytical chemistry*, 1996, vol. 354, pp. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s0021663540648>
79. Mitko K., Bebek M. ICP-OES determination of trace elements in salinated water samples. *Atomic spectroscopy-norwalk Connecticut*, 1999, vol. 20, no. 6, pp. 217–223.
80. Li X.J., et al. Determination of trace metal ions Co, Cu, Mo, Mn, Fe, Ti, V in reference river water and reference seawater samples by inductively coupled plasma emission spectrometry combined with the third phase preconcentration. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 1996, vol. 356, pp. 52–56. <https://doi.org/10.1007/s0021663560052>
81. Townsend A.T., et al. The determination of copper, zinc, cadmium and lead in urine by high resolution ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1998, vol. 13, no. 11, pp. 1213–1219. <https://doi.org/10.1039/A805021J>
82. Mota J.P.V., et al. Determination of cadmium in environmental and biological reference materials using isotope dilution analysis with a double focusing ICP-MS: a comparison with quadrupole ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1999, vol. 14, no. 9, pp. 1467–1473. <https://doi.org/10.1039/A901753D>
83. Mataveli L.R.V., et al. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2016, vol. 2016, article id: 3968786 <https://doi.org/10.1155/2016/3968786>
84. Cholak J., Hubbart D.M. Determination of Cadmium in Biological Material. Spectrographic, Polarographic, and Colorimetric Methods. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 1944, vol. 16, no. 5, pp. 333–336. <http://dx.doi.org/10.1021/i560129a024>
85. Bharti A.S., Sharma S., Uttam K.N. Elemental assessment of the leaf and seed of Rauwolfia serpentina (Sarpagandha) by direct current arc optical emission spectroscopy. *National Academy Science Letters*, 2020, vol. 43, pp. 361–365. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-019-00872-4>
86. Ma W., et al. Volatilization and leaching behavior of heavy metals in MSW incineration fly ash in a DC arc plasma furnace. *Fuel*, 2017, vol. 210, pp. 145–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.091>
87. Shukla N. Trace Metal Analysis of Red Tomato by Direct Current Arc Optical Emission Spectroscopy. *Indian J. Sci. Res*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 01–05.
88. Polyakova E.V., Shuvaeva O.V. Determination of Calcium, Magnesium, Iron, Copper, Zinc, and Phosphorus in Blood Serum by Arc Atomic Emission Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2005, vol. 60, no. 10, pp. 937–941. <http://dx.doi.org/10.1007/s10809-005-0212-9>
89. Gladkikh E.A., et al. Application of atomic emission spectrometry with excitation of spectra in a direct current arc to assess the average levels of macro- and microelements in human hair. *Mikroelementy v meditsine [Microelements in Medicine]*. 2003, vol. 4, no. 3, pp. 20–24. (In Russian)
90. Zaksas N.P. Capabilities of a two-jet arc plasmatron for atomic emission spectral analysis of high-purity substances and biological samples. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]*. 2012, vol. 78, no. 1–2, pp. 34–38. (In Russian)
91. Zaksas N.P., Varyaskin A.F. Double-jet arc plasma: matrix influences and methods for their suppression. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]*. 2019, vol. 85, no. 1(II), pp. 139–144. (In Russian)
92. Bozorgzadeh E., Pasdaran A., Ebrahimi-Najafabadi H. Determination of toxic heavy metals in fish samples using dispersive micro solid phase extraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy. *Food Chemistry*, 2021, vol. 346, article id: 128916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128916>
93. Nyaba L., et al. Speciation of inorganic selenium in environmental samples after suspended dispersive solid phase microextraction combined with inductively coupled plasma spectrometric determination. *Talanta*, 2016, vol. 159, pp. 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.06.023>
94. Nyaba L., Matong J.M., Nomngongo P.N. Nanoparticles consisting of magnetite and Al₂O₃ for ligandless ultrasound-assisted dispersive solid phase microextraction of Sb, Mo and V prior to their determination by ICP-OES. *Microchimica Acta*, 2016, vol. 183, pp. 1289–1297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-016-1766-y>
95. Ranjbar L., et al. Ionic liquid based dispersive liquid-liquid microextraction combined with ICP-OES for the determination of trace quantities of cobalt, copper, manganese, nickel and zinc in environmental water samples. *Microchimica Acta*, 2012, vol. 177, pp. 119–127. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-011-0757-2>
96. Lemos V.A., dos Santos Vieira E.V. Method for the determination of cadmium, lead, nickel, cobalt and copper in seafood after dispersive liquid-liquid micro-extraction. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 2014, vol. 31, no. 11, pp. 1872–1878. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.964338>
97. Dos Santos Silva E., et al. Dispersive liquid-liquid microextraction for simultaneous determination of cadmium, cobalt, lead and nickel in water samples by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Microchimica Acta*, 2012, vol. 178, pp. 269–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-012-0836-z>
98. Castro G.R., et al. Determination of Cd (II), Cu (II) and Ni (II) in aqueous samples by ICP-OES after on-line preconcentration in column packed with silica modified with 2-aminothiazole. *Microchimica Acta*, 2008, vol. 160, pp. 203–209. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-007-0845-5>
99. Zougagh M., de Torres A.G., Pavón J.M.C. Determination of cadmium in water by ICP-AES with on-line adsorption preconcentration using DPTH-gel and TS-gel microcolumns. *Talanta*, 2002, vol. 56, no. 4, pp. 753–761. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(01\)00605-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(01)00605-1)
100. Ferreira S. L. C. et al. Copper determination in natural water samples by using FAAS after preconcentration onto amberlite XAD-2 loaded with calmagite. *Talanta*, 2000, vol. 50, no. 6, pp. 1253–1259. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00230-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00230-1)
101. Bloxham, Martin J. The determination of trace metals in sea water using ICP-MS. Diss. University of Plymouth, 1994.
102. Kilbride C., Poole J., Hutchings T.R.A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 143, no. 1, pp. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.013>
103. Bakircioglu D., Kurtulus Y.B., Yurtsever S. Comparison of extraction induced by emulsion breaking, ultrasonic extraction and wet digestion procedures for determination of metals in edible oil samples in Turkey using ICP-OES. *Food chemistry*, 2013, vol. 138, no. 2–3, pp. 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.089>
104. Demakov Yu.P., et al. The use of X-ray fluorescence analysis to assess the content of chemical elements in the soil of forest biogeocenoses. In: *Nauchnyye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaya Kokshaga» [Scientific works of the State Nature Reserve "Bolshaya Kokshaga"]*. 2017, no. 8, pp. 56–75. (In Russian)
105. Umarov N.N. Study of the content of heavy metals in the soil and plants of prickly caper (*Capparis spinosa* L.) and wormwood (*Artemisia absinthium* L.) by X-ray fluorescence analysis. *Ekosistemy [Ecosystems]*. 2022, no. 29, pp. 43–50. (In Russian)
106. Chernova R.K., et al. Determination of lead content in soils of Saratov by X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya [News of Saratov University. New episode. Chemistry series. Biology. Ecology]*. 2013, vol. 13, no. 3, pp. 108–113. (In Russian)

107. Trunova V.A., Zvereva V.V. Method of X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation: objects of study. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1401–1407. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.15372/JSC20160705>
108. Trunova V.A., Zvereva V.V. Investigation of insoluble endogenous fractions of gastrointestinal tract by SRXRF. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 266–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.238>
109. Trunova V.A., Brenner N.V., Zvereva V.V. Investigation of the content and of the distribution of chemical elements in human nails by SRXRF. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 2009, vol. 19, no. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1080/15376510801891310>
110. Fedotov A.P., et al. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments. *Environmental earth sciences*, 2015, vol. 73, pp. 7297–7314. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3906-1>
111. Stepanova O.G., et al. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments. *Environmental earth sciences*, 2015, vol. 74, pp. 2029–2040. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4457-9>
112. Stepanova O.G., et al. Studies of bottom sediments of the proglacial lake Ekhoi (Eastern Sayan) using the XRF-SI method. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical series*. 2015, vol. 79, no. 1, pp. 132–132. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.7868/S0367676515010317>
113. Siromlya T.I., Khudyaev S.A., Syso A.I. Use of the XRF-SI method in soil-ecological studies in the territory of Novosibirsk. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 101–101. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0367676515010287>
114. Kulmatov R.A., Kist A.A., Karimov I.I. Neutron activation assessment of the distribution of elements in waters. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry]. 1980, vol. 35, no. 2, pp. 254–259. (In Russian)
115. Muzafarov A.M., et al. Methods for assessing the technogenic impact of tailings of industrial enterprises on the environment. *Gornyi vestnik Uzbekistana* [Mining Bulletin of Uzbekistan]. 2002, no. 2, pp. 85–89. (In Russian)
116. Muzafarov A.M., Kulmatov R.A. Multielement analysis of chemical elements in soil samples using the instrumental neutron activation method. *Universum: tekhnicheskiye nauki* [Universum: technical sciences]. 2020, vol. 12–3, no. 81, pp. 100–104. (In Russian)
117. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection. *Analytica chimica acta*, 2008, vol. 621, no. 2, pp. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.05.034>
118. Kot A., Namiesnik J. The role of speciation in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2000, vol. 19, no. 2–3, pp. 69–79. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00195-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00195-8)
119. Shuvaeva O.V., Belchenko L.A., Romanova T.E. Studies on cadmium accumulation by some selected floating macrophytes. *International journal of phytoremediation*, 2013, vol. 15, no. 10, pp. 979–990. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751353>
120. Romanova T.E., Shuvaeva O.V., Belchenko L.A. The mesocosm study of cadmium and copper bioaccumulation by water hyacinth in one-time and sequentially contaminated system. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2015, vol. 95, no. 13, pp. 1186–1194. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2014.1002490>
121. Fujita M. The presence of two Cd-binding components in the roots of water hyacinth cultivated in a Cd²⁺-containing medium. *Plant and cell physiology*. 1985, vol. 26, no. 2, pp. 295–300.
122. Sadi B.B.M., et al. An HPLC-ICP-MS technique for determination of cadmium-phytochelatin in genetically modified *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Chromatography B*, 2008, vol. 861, no. 1, pp. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2007.11.004>
123. Yen T. Y., Villa J. A., DeWitt J. G. Analysis of phytochelatin–cadmium complexes from plant tissue culture using nano-electrospray ionization tandem mass spectrometry and capillary liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Journal of mass spectrometry*, 1999, vol. 34, no. 9, pp. 930–941. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9888\(199909\)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9888(199909)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e)
124. Barakiewicz D., et al. Determination of cadmium and lead species and phytochelatin in pea (*Pisum sativum*) by HPLC–ICP–MS and HPLC–ESI–MSn. *Talanta*, 2009, vol. 79, no. 2, pp. 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.04.026>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Альфия Р. Цыганкова, Сергей А. Гуляев, Любовь С. Адаменко и Михаил А. Шестопалов проанализировали данные, написали рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alphiya R. Tsygankova, Sergey A. Gulyaev, Lyubov S. Adamenko and Michael A. Shestopalov analysed the data and wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Альфия Р. Цыганкова / Alphiya R. Tsygankova <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>
 Сергей А. Гуляев / Sergey A. Gulyaev <https://orcid.org/0009-0006-3466-9791>
 Любовь С. Адаменко / Lyubov S. Adamenko <https://orcid.org/0000-0001-6412-3622>
 Михаил А. Шестопалов / Michael A. Shestopalov <https://orcid.org/0000-0001-9833-6060>