



Научная статья

УДК 66-914.5

DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-2-44-54

ПЕРСПЕКТИВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ В ВОДОЕМАХ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.В. Ситанов¹, П.Б. Разговоров², Д.И. Блинов¹, Д.А. Лебедев¹

Дмитрий Вячеславович Ситанов, канд. хим. наук, доцент; Павел Борисович Разговоров, д-р техн. наук, профессор; Даниил Игоревич Блинов, магистрант; Денис Александрович Лебедев, бакалавр
¹ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 15000, Россия, г. Иваново, Шереметевский просп., д.7, sitanov@isuct.ru

²ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 150023, Россия, г. Ярославль, Московский просп., д. 88, razgovorovpb@ystu.ru

Ключевые слова:
диэлектрический
барьерный разряд,
оптическая эмиссионная
спектроскопия, водоемы
Ивановской области,
идентификация
загрязнений, контроль
металлов

Аннотация. Изучается возможность использования оптической эмиссионной спектроскопии, в которой в качестве источника возбуждения служит диэлектрический барьерный разряд, реализуемый на экспериментальной установке со слюдяной пластиной «Partsko» (частота 1-50 кГц, напряжение на электродах 3-5 кВ) для диагностики и контроля содержания загрязняющих веществ и, в частности, металлов в водоемах естественного происхождения. Данный физико-химический метод является инновационным и перспективным для идентификации и анализа источников загрязнения металлами сточных вод от промышленных предприятий, организаций сельского хозяйства, бытовых объектов и транспортной инфраструктуры.

Для цитирования:

Ситанов Д.В., Разговоров П.Б., Блинов Д.И., Лебедев Д.А. Перспективы диэлектрического барьерного разряда для диагностики и контроля металлов в водоемах Ивановской области // От химии к технологии шаг за шагом. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 44-54. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/7273/view>

Введение

Физико-химические методы исследования, основанные на взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, занимают центральное место в современной науке и технике, обеспечивая возможность для идентификации, количественного анализа и исследования состава веществ различного происхождения. Эти методы позволяют получать ценную информацию о строении, физических и химических свойствах исследуемых материалов, не прибегая к разрушающему воздействию, что делает их надежными инструментами в широком спектре научных исследований и промышленных применений [1].



В частности, далеко за рамки идентификации веществ вышли спектральные методы. Они играют важную роль в проведении фундаментальных исследований, позволяют оценить атомную и молекулярную структуру, изучить специфику межмолекулярных взаимодействия, кинетику химических реакций и процессы переноса энергии [2, 3]. В материаловедении спектроскопия позволяет анализировать состав сплавов и качество наносимых и отвержденных покрытий, контролировать процессы роста кристаллов, и это еще не полный перечень ее практического применения [4, 5].

Востребованность различных спектральных методов для решения многочисленных промышленных физико-химических и повседневных задач демонстрирует высокую эффективность. В частности, в 2020-х гг. широкое распространение получают недорогие рентгенофлуоресцентные спектрометры для идентификации ювелирных товаров на таможне, проверки их качества и степени чистоты [6]. В ряду актуальных практических задач можно отметить анализ остатков древних артефактов с помощью рентгеновской флуоресцентной спектрометрии (РФЭС). Рамановскую спектроскопию (спектроскопию комбинационного рассеяния) в настоящее время используют для выявления биомаркеров рака в тканях, ранней диагностики заболеваний и повышения эффективности лечения. Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК-спектроскопия) применяется для анализа состава продуктов питания, обеспечивая при этом надлежащий контроль их качества и безопасность. Спектроскопические методы дистанционного зондирования, такой как *DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)*, позволяют с высокой точностью и чувствительностью определить концентрацию загрязняющих веществ в атмосфере.

В настоящей работе поставлена цель – изучить возможность использования оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС), технически реализуемой путем возбуждения электронов диэлектрическим барьерным разрядом (ДБР), для контроля содержания металлов для мониторинга качества водных растворов и сред с попутной перспективой выявления потенциальных источников загрязнений. Поскольку анализу подвергается непосредственно жидкая фаза, этот подход может успешно реализоваться также при исследовании биологических тканей, решения научно-практических вопросов, связанных с определением элементного состава крови, мочи, слюны, для ранней диагностики проблем со здоровьем и мониторинга фактов заражения и (или) отравлений.

Описание установки и методики экспериментов

ОЭС, используемая совместно с ДБР, является мощным физико-химическим инструментом для анализа состава образцов [7]. Однако для получения достоверных результатов необходимо соблюдать определенные условия и учитывать факторы, влияющие на вид и характер эмиссионного спектра [8]. В первую очередь, это касается подготовки образцов. В нашем случае эксперименты проводили с жидкими образцами, собираемыми непосредственно как материалы окружающей среды.

Природные образцы часто оказываются загрязненными (мелкие частицы ила или песка, особенно если образцы отобраны из придонной части водоема). Поэтому перед исследованием жидкости фильтровали через бумажный фильтр, затем отстаивали при



комнатной температуре в течение 24 ч. За критерий допустимой степени очистки образцов принимали отсутствие загрязнений, видимых невооруженным глазом на фильтровальной бумаге при пропускании через нее анализируемого образца.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

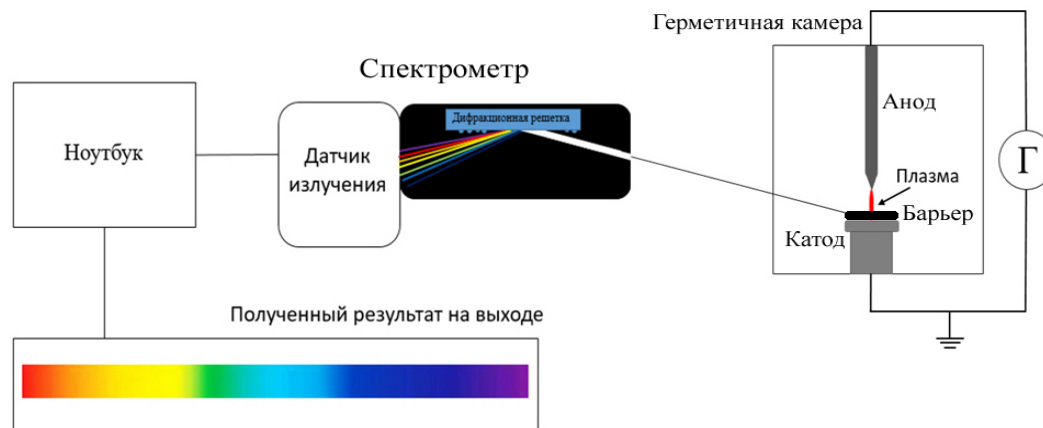


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения исследований

Для эксперимента использовали герметичную прозрачную камеру, излучение из которой выводилось через боковое отверстие. На заземленный столик ячейки помещали диэлектрический барьер и на него укладывали ткань, смоченную жидкостью, состав которой исследовали на наличие металлов. Столик (катод) и второй цилиндрический электрод разрядной системы (анод) были выполнены из нержавеющей стали. При этом опыты проводили с анодом различной конфигурации – от заостренного до имеющего в основании плоский срез различной площади. Выявлено, что наиболее подходящий вариант – анод с плоским круглым основанием диаметром 4.0 мм. При этом разряд горел устойчиво, а ткань (физический носитель объекта исследования – жидкости) не подвергалась плазменной деструкции.

Для реализации ДБР необходимо подобрать подходящий диэлектрический барьер. При этом анализировали различные материалы – стекло, слюду и силиконовую подложку. Лучшим образом показала себя слюдяная пластина “Partsko”. Для нее найден оптимальный компромисс между величиной электрической прочности и толщиной, так как с увеличением толщины барьера снижается интенсивность свечения разряда. По нашим оценкам, среднее время работы одной слюдяной пластины составляет 75 ч (достаточно для экспресс-анализа). В заводском исполнении такие листы выдерживали напряжение до 20 кВ на электродах разрядной системы при варьировании частоты в широких пределах. С высокими частотами не работали, что было связано с отсутствием на данном этапе эксперимента подходящего высоковольтного генератора. Генератор Г для опытов (см. рис. 6) изготовили самостоятельно по классической двухтактной схеме ZVS-драйвера с фиксированной частотой; таковая может варьироваться в диапазоне 1-50 кГц (за счет незначительных изменений конструкции). В данной работе на частоте 15 кГц получали стабильный разряд без признаков искровых пробоев при использовании цилиндрического анода. Напряжение на электродах составляло 3-5 кВ, в зависимости от получения воспроизводимого спектра с достаточной интенсивностью излучения характеристических линий металлов. Обязательным является требование



предотвращения плазменной (температурной) деструкции тканевой основы, выполняющей, ввиду хорошего впитывания жидкостей, функцию носителя объектов исследования. Отсутствие травления ткани контролировали визуальным методом. Решение по использованию ткани в качестве носителя анализируемой жидкости пришло интуитивным путем. При включении разряда жидкость эффективно испарялась с ткани, образуя в межэлектродном пространстве паровое облако анализируемой жидкости. Высокие поля, реализуемые в межэлектродном пространстве, способствовали переносу ионов металлов в газовую фазу.

Характерно, что предлагаемый инновационный физико-химический способ контроля металлических соединений в пробах достаточно прост в реализации, но имеет недостаток, связанный с необходимостью недопущения травления ткани в процессе анализа жидкости. С учетом малой продолжительности эксперимента (не более 20-30 с), этот недостаток в данном случае не являлся критичным.

Для опытов использовали портативный малый дифракционный 55-миллиметровый спектрометр *CLMG-7206* фирмы *Gain Express* (Китайская Народная Республика). Спектрометр не требует отдельного источника питания, имеет малые размеры, может использоваться в полевых условиях; спектральный рабочий диапазон – 350-950 нм, спектральное разрешение – 1.2 нм. В качестве детектора использовали веб-камеру *Logitech HD Webcam C270* (1.3 Мпикс), обеспечивающую автоматическую коррекцию освещенности и естественную цветопередачу. Разрешающая способность указанной камеры позволила авторам настоящей работы успешно зафиксировать резонансные линии металлов в спектрах излучения.

Основная часть

В рамках данного исследования поставлены две задачи, имеющие как сугубо научный, так и прикладной характер. Первая из них включает подбор объектов для разработки экспресс-методики контроля металлов в водных средах и водоемах. Вторая задача касается получения для подобранных объектов систематических спектральных данных, которые можно было бы заложить в качестве основы для количественного анализа. Также представляется целесообразным определиться с основным перечнем элементов, которые будем считать потенциально опасными в соответствующей ситуации.

Если выбор микроэлементов, необходимых для функционирования живых существ, является простым и понятным (это, в первую очередь, *Fe*, *K*, *Na* и *Mn*) [9], то для металлов, оказывающих вредное воздействие, необходимо проанализировать пути их проникновения в организм человека или в стебли и кору растений и соответствующие источники их повышенной концентрации.

Так, источниками накопления свинца (*Pb*) являются промышленные выбросы (в первую очередь, от металлургических предприятий, связанных с переработкой свинцовых руд), транспорт (автомобильные выбросы, особенно в районах с интенсивным движением), а также сельскохозяйственные химикаты (пестициды и удобрения могут



содержать свинец в качестве примеси). Свинец накапливается в почве и может поглощаться корнями растений, особенно в кислых средах.

Кадмий (*Cd*) часто присутствует в фосфоритах, используемых для производства удобрений, и при их внесении может накапливаться в почве. Предприятия по производству (переработке) аккумуляторов, гальванические цеха и металлургические заводы могут выбрасывать кадмий в окружающую среду. Кадмий легко поглощается корнями растений из почвы, может накапливаться в съедобных частях растений, таких как листья и плоды.

Предприятия по переработке руд и сжигания угля являются основными источниками выбросов ртути (*Hg*). Достаточно часто соединения ртути используют также в качестве фунгицидов, что приводит к загрязнению почвы. Ртуть, как и любой тяжелый металл, накапливается в листьях растений и может по пищевой цепи проникать в живые организмы. Поглощение ртути корнями из почвы менее значительно, но вполне допускается в сильно загрязненных промышленных районах.

Предприятия по производству нержавеющей стали, никелевых сплавов, кожевенные заводы и текстильная промышленность выбрасывают в окружающую среду никель (*Ni*) и хром (*Cr*). Сжигание угля и нефти приводит к выбросу никеля в атмосферу. Никель поглощается корнями растений из почвы и может накапливаться в листьях и семенах. Концентрация никеля в растениях увеличивается в кислых почвах.

К основным источникам накопления в почве меди (*Cu*) следует отнести сельскохозяйственные химикаты. Соединения меди используются в качестве фунгицидов и пестицидов. Частое применение таких препаратов может привести к накоплению меди в почве, что приводит к нарушению развития корневой системы и снижению урожайности.

Предприятия металлургии, гальванические производства и лакокрасочная промышленность загрязняют окружающую среду цинком (*Zn*). Автомобильные выхлопы, особенно вблизи дорог с интенсивным движением, могут служить источником цинка, оседающего на почве и растениях в виде солей. Степень загрязнения цинком сильно зависит от содержания глинистых минералов и уровня pH почвы (с ростом pH степень загрязнения снижается). Стоит отметить, что как избыток, так и недостаток цинка могут негативно сказываться на росте и развитии растений, влиять на процессы фотосинтеза и синтеза хлорофилла.

Источники загрязнения стронцием (*Sr*) также довольно обширны. В первую очередь – это аварийные выбросы на предприятиях атомной промышленности. Во-вторых, предприятия цветной металлургии по переработке руд, содержащих стронций, а также некоторые предприятия химической промышленности и производства керамических изделий и стекла. Действительно, стронций может использоваться в качестве добавки для улучшения свойств фарфора и огнеупорных материалов, а также этот вид загрязнения следует учитывать при производстве фосфатных удобрений, поскольку некоторые виды фосфоритов обогащены стронцием [10].

Таким образом, осуществление периодического мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде оказывается весьма актуальной задачей. Подобные исследования ведутся [11], но они, как правило, носят частный характер. Пробы предварительно



собираются, подготавливаются и только потом подвергаются исследованиям; причем для этих целей часто требуются дорогостоящие реактивы с высокой степенью очистки. Использование нетрадиционных физико-химических методов исследования – ОЭС с применением мобильных установок возбуждения разряда при атмосферном давлении (например, ДБР) позволит получать данные о наличии металлов в пробах непосредственно на местности.

Для определения концентрации металлов в водоемах использовали методику внутреннего стандарта [12], для реализации которой необходимы соответствующие калибровочные зависимости. С целью их получения нами исследованы эмиссионные спектры излучения разбавленных растворов солей металлов, наличие которых потенциально возможно в собираемых пробах.

Для построения калибровочных кривых использовали спектральные данные для растворов хлоридов металлов с концентрациями соответственно: 0.005; 0.010; 0.050; 0.100; 0.500 и 1.000 мг/л для каждого металла. Эмиссионные спектры, полученные нами для металлов, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристические длины волн излучения исследованных элементов

№ п/п	Анализируемый металл	Выбранные длины волн излучения, λ, нм
1	Na	589
2	K	583
3	Fe	516; 432
4	Mn	403
5	Cu	589; 406
6	Zn	577
7	Pb	405
8	Cd	643
9	Ni	471
10	Sr	581; 472
11	Hg	546; 436

Здесь представлен также перечень выбранных длин волн излучения, однозначно отвечающих возбуждению того или иного химического элемента, проявляющегося в спектре.

Далее приведены результаты анализа проб, собранных из естественных водоемов вблизи Уводьского водохранилища в Ивановской обл. (Россия) около населенных пунктов Егорий, Худынино и Микшино. Анализ спектров излучения от образцов, собранных около данных населенных пунктов, показал, что основными элементами, фиксируемыми спектрально, являются свинец, железо, цинк и медь. Элементы стронций и кадмий не зафиксировали даже в следовых количествах, поэтому в качестве внутреннего стандарта использовали хлориды указанных металлов.

Ниже на рис. 2-4 представлены эмиссионные спектры для опытных образцов, собранных вблизи названных населенных пунктов.

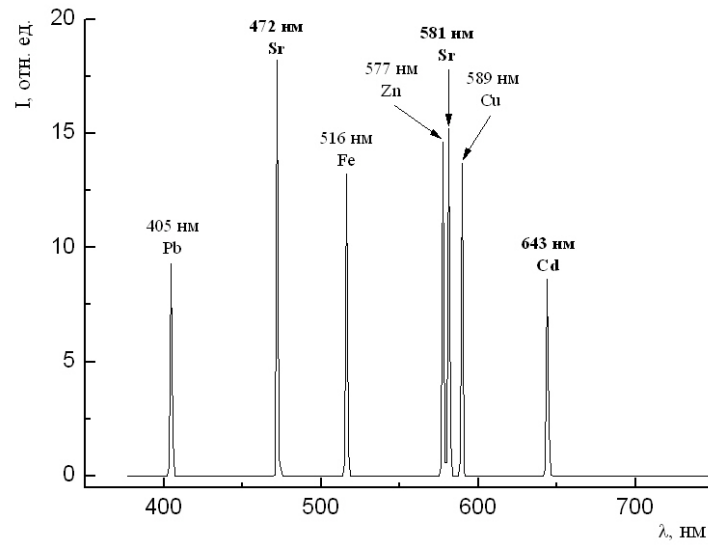


Рис. 2. Спектр излучения пробы, собранной авторами вблизи населенного пункта Егорий (Ивановская обл.)

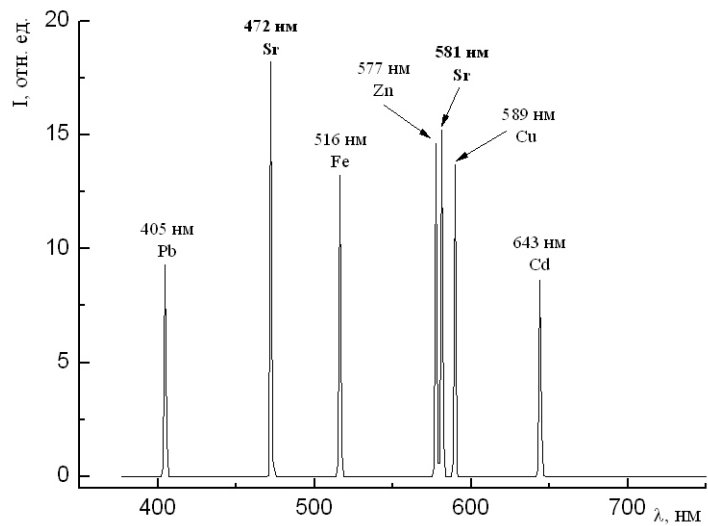


Рис. 3. Спектр излучения пробы, собранной авторами вблизи населенного пункта Худынино (Ивановская обл.)

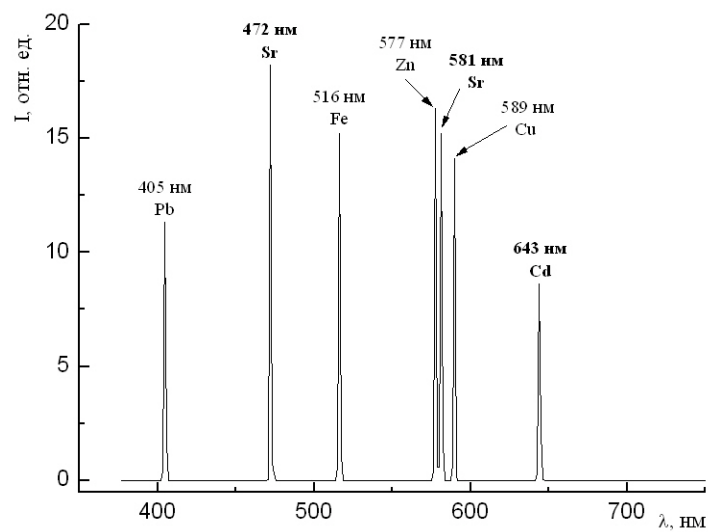


Рис. 4. Спектр излучения пробы, собранной вблизи населенного пункта Микшино (Ивановская обл.)



На рис. 2-4 линии стронция (*Sr*) и кадмия (*Cd*) отвечают излучению внутреннего стандарта – специально введенной в пробу добавки в виде хлоридов металлов с концентрацией 1 мг/л.

Калибровочные зависимости (см. рис. 5, 6) получены для значений концентраций целевых (определяемых) металлов в диапазоне 0.005...1.000 мг/л и, соответственно, для концентраций внутреннего стандарта (*Sr* и *Cd*), равных 1.000 мг/л. Соответствие концентрации внутреннего стандарта для экспериментальных проб и калибровочных зависимостей является основным условием получения достоверных количественных результатов.

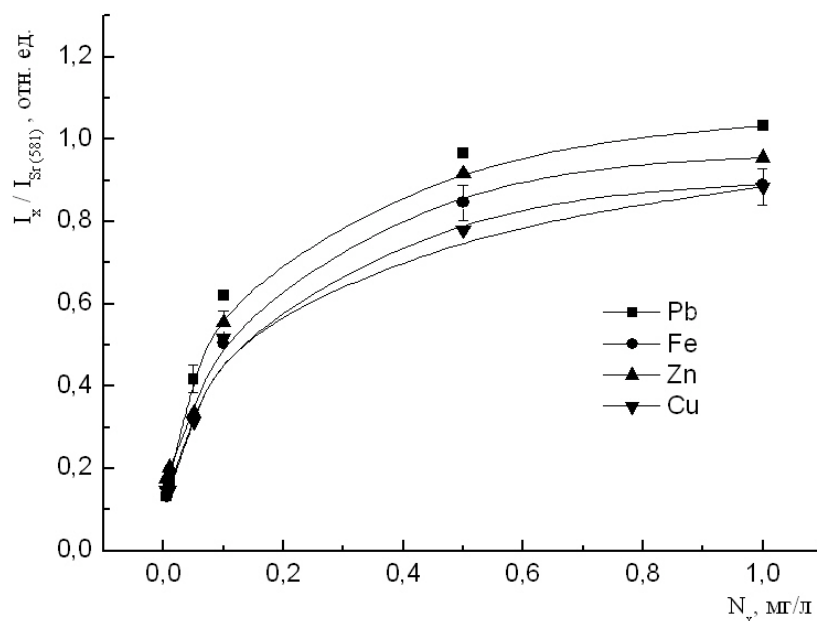


Рис. 5. Калибровочная зависимость; внутренний стандарт – стронций (*Sr*)

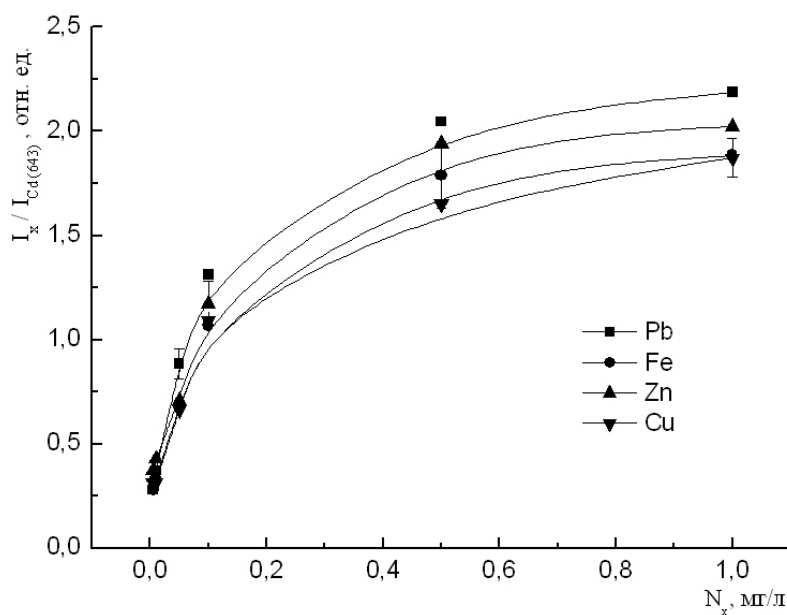


Рис. 6. Калибровочная зависимость; внутренний стандарт – кадмий (*Cd*)



На калибровочных зависимостях N_x – концентрация хлоридов соответствующих солей, поэтому в дальнейшем производили пересчет на концентрацию металла по формуле химического соединения, получая N_m . Использование солей в качестве внутреннего стандарта необходимо для проверки влияния фактора различных вероятностей возбуждения состояний на интенсивности излучения. Действительно, если обработка данных, полученных с использованием двух различных стандартов, даст соизмеримые результаты концентраций металлов в одинаковых пробах, можно полагать, что данный факт будет автоматически учтен при реализации методики внутреннего стандарта; однако этот момент требует отдельного обсуждения.

Действительно, интенсивность излучения в эмиссионной спектроскопии зависит не только от концентрации, но и от коэффициента скорости возбуждения излучающего состояния, который для металлов может различаться. Это важный аспект в контексте предложенной методики; следующие рассуждения поясняют, почему коэффициент скорости возбуждения (KCB) не был учтен явно. Реализация методики внутреннего стандарта (методика актинометрии) предусматривает построение зависимости отношения интенсивностей целевого компонента ($I_{цел}$) от концентрации целевого металла ($C_{цел}$). KCB для каждого металла (Pb, Fe, Zn, Cu), для стронция (Sr) в одном из вариантов и для (Cd) во втором, оказывается неявно учтен в калибровочной зависимости. Действительно, KCB (вероятность возбуждения с последующим излучением) определяет, насколько эффективно атом данного металла переходит в возбужденное состояние под действием энергии плазмы (в данном случае – $ДБР$) и затем излучает фотон (при этом полагаем, что возбужденные состояния гибнут с излучением фотона). Этот коэффициент тесно связан:

- с вероятностью того, что при столкновении с электроном атом перейдет на конкретный верхний энергетический уровень;
- с энергетическим распределением электронов в плазме (факторы температуры эксперимента и концентрации электронов), то есть числом электронов, обеспечивающих возбуждение атомов.

ОЭС измеряет **излучение**, которое является результатом всех процессов, включая испарение, атомизацию, ионизацию, возбуждение и последующее излучение. Таким образом, интенсивность линии – это комплексный показатель.

Теперь обозначим роль внутреннего стандарта. В рамках одного эксперимента (как калибровочного, так и для неизвестной пробы) все анализируемые элементы находятся в одинаковых условиях при $ДБР$. Это означает, что они подвергаются одному и тому же энергетическому воздействию плазмы, то есть флуктуации параметров $ДБР$ (температура, концентрация электронов, геометрии плазмы) для рассматриваемых элементов будут сопоставимы. С другой стороны, когда берем отношение $I_{цел}/I_{Sr}$, по сути, делим интенсивность целевого металла, которая включает его KCB и эффекты плазмы, на интенсивность стронция, которая включает его KCB и те же эффекты плазмы. Если параметры плазмы непостоянны (например, температура), это может приводить к изменению интенсивности как целевого металла, так и стронция. В результате соотношение их остается относительно постоянным, несмотря на изменение абсолютных интенсивностей. Таким образом, калибровочная кривая $I_{цел}/I_{Sr} = f(C_{цел})$ будет



эмпирически отражать суммарный эффект от концентрации, *КСВ* целевого металла, *КСВ* стронция (стандарт), а также от влияния *ДБР*. Она показывает, как отношение измеряемых сигналов зависит от аналитической величины (концентрации); при этом все другие факторы, влияющие на интенсивность, усредняются и компенсируются за счет использования внутреннего стандарта.

С учетом вышеизложенного, определены концентрации металлов в различных пробах из водоемов Ивановской обл. (Российская Федерация) (см. табл. 2). В качестве исходных экспериментальных данных использовали данные, приведенные на рис. 1-5.

Таблица 2. Результаты определения концентрации металлов в водных пробах, собранных в водоемах Ивановской обл. (Россия) в пересчете на концентрацию чистого металла (N_m)

Населенный пункт Егорий				
Металл в пробе	N_m , мг/л (стандарт Sr)	N_m , мг/л (стандарт Cd)	Усреднение N_m по двум стандартам, мг/л	ПДК, мг/л
Свинец	0,08±0,01	0,05±0,01	0,07±0,01	0,03
Железо	0,23±0,01	0,12±0,01	0,18±0,01	0,30
Медь	0,56±0,04	0,28±0,02	0,42±0,03	1,00
Цинк	0,46±0,03	0,15±0,01	0,31±0,02	1,00
Населенный пункт Худынино				
Свинец	0,07±0,01	0,05±0,01	0,06±0,01	0,03
Железо	0,33±0,02	0,12±0,01	0,23±0,02	0,30
Медь	0,64±0,05	0,20±0,02	0,42±0,03	1,00
Цинк	0,62±0,04	0,19±0,01	0,41±0,03	1,00
Населенный пункт Микшино				
Свинец	0,18±0,01	0,08±0,01	0,13±0,01	0,03
Железо	0,62±0,04	0,17±0,01	0,40±0,01	0,40
Медь	0,60±0,05	0,23±0,02	0,42±0,03	1,00
Цинк	0,63±0,05	0,23±0,01	0,43±0,03	1,00

Примечание: для получения калибровочных зависимостей во всех случаях использовали хлориды металлов – $PbCl_2$, $FeCl_3$, $CuCl_2$, $ZnCl_2$.

Качественный набор металлов, зафиксированный в пробах, взятых в различных населенных пунктах, оказался идентичным, что объясняется объединением водоемов единой системой (Уводьское водохранилище). Однако количественный состав металлов в анализируемых пробах оказался различным. В частности, результаты, полученные в пункте Микшино (Ивановская обл.), указывают на значительное превышение показателем концентрации свинца уровня предельно-допустимых значений для данного тяжелого металла (ПДК). Характерно, что значения ПДК применяли как для питьевой воды, так и для водоемов хозяйственного и бытового назначения [11].

Выводы

Использование ОЭС в практическом сочетании с *ДБР*, реализуемым при атмосферном давлении, позволит с достаточной степенью точности зафиксировать ряд загрязнений, каковыми явились тяжелые металлы в природных водных пробах Ивановской области. Чувствительность предлагаемого физико-химического метода исследования находится на уровне предельно допустимой концентрации загрязнителя.



Реализация подобного подхода оказывается весьма перспективной с практической точки зрения, так как служит основой для конструирования мобильных портативных установок, необходимых для осуществления мониторинга состояния окружающей среды.

Список источников

1. Гудилин Д.Ю. Оптическая эмиссионная спектроскопия тлеющего разряда: возможности метода и оборудование. *Лаборатория и производство*. 2021, 1 (16), 54-61. DOI: 10.32757/2619-0923.2021.1.16.54.61.
2. Голубятников Г.Ю., Кошелев М.А., Цветков А.И., Фокин А.П., Ананичев А.А., Глявин М.Ю., Третьяков М.Ю. Применение гиротронов для молекулярной газовой спектроскопии. *Известия вузов. Радиофизика*. 2022, 65(3), 169-183. DOI: 10.52452/00213462_2022_65_03_169.
3. Rothbart N., Stanley V., Koczulla R., Jarosch I., Holz O., Schmalz K., Hübers H.-W. Millimeter-wave gas spectroscopy for breath analysis of COPD patients in comparison to GC-MS. *J. Breath Res.* 2022, 16, 46001-46015. DOI: 10.1088/1752-7163/ac77aa.
4. Krähling T., Müller S., Meyer C., Stark A.-K, Franzke J. Liquid electrode dielectric barrier discharge for the analysis of solvated metal. *J. Anal. At. Spectrom.* 2011, 26(10), 1974-1978. DOI: 10.1039/c1ja10138b.
5. Tombrink S., Müller S., Heming R., Michels A., Lampen P., Franzke J. Liquid analysis dielectric capillary barrier discharge. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2010, 397(7), 2917-2922. DOI: 10.1007/s00216-010-3844-z.
6. Лучинин В., Колядин А., Ягудаев Ю., Ильин С. Алмаз электронного качества. инновации. инвестиции. креативные проекты. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2023, 225(4), 70-89. DOI: 10.22184/1992-41782023.225.4.70.89.
7. Ситанов Д.В., Блинов Д.И. Контроль содержания металлов в составе биологических структур // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024, 5(1), 65-74. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5007/view>.
8. Bae G.T, Kim J.Y., Kim D. Y., Jung E. Y., Jang H. J, Park Ch.-S, Jang H., Lee D.H., Lee H.-K., Tae H.-S. Potential Application of Pin-to-Liquid Dielectric Barrier Discharge Structure in Decomposing Aqueous Phosphorus Compounds for Monitoring Water Quality. *Materials*. 2021, 14 (24), 7559-7571. DOI: 10.3390/ma14247559.
9. Давлетшина Г.И., Фридланд С.В. Влияние минерального состава питьевой воды на здоровье населения города Магнитогорска. *Безопасность жизнедеятельности*. 2010, 119(11), 15-19.
10. Казакова Н.А., Садретдинова Л.Р., Мухаметшин А.А. Исследование почв территорий промышленных предприятий на предмет наличия тяжелых металлов. *Евразийский союз ученых*. 2019, 12-2(69), 9-13.
11. Извекова Т.В., Гусев Г.И., Гордина Н.Е., Ситанов Р.Д., Гуцин А.А. Оценка влияния шламонакопителя железосодержащих отходов на компоненты окружающей среды. *Известия ВУЗов. Серия Химия и хим. технология*. 2024, 67(11), 145-153. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7140.
12. Хрущев А.Ю., Акмаев Э.Р., Бондаренко В.О., Метлин А.Е. Использование гексацианоферрата (III) калия в качестве внутреннего стандарта при количественном определении кетопрофена методом КР-спектроскопии. *Аграрная наука*. 2020, 1, 13-16. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-334-1-13-16.

Поступила в редакцию 02.03.2026

Одобрена после рецензирования 10.04.2026

Принята к опубликованию 23.04.2026