

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА, МЕДИ, НИКЕЛЯ, ХРОМА И ЦИНКА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ПРИСУТСТВИИ

**Р.В. Абражеев[✉], Н.И. Куанчу Нжеуджи, Д.Л. Валькова,
О.В. Нипрук, Е.В. Елипашева**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия*

[✉] abrazheev@chem.unn.ru

Аннотация. Предложили методику одновременного рентгенофлуоресцентного определения катионов железа, меди, никеля, хрома и цинка в водных растворах. Методика использует математическую модель, описывающую зависимость интенсивности рентгенофлуоресцентного излучения от состава образца. Модель включала пять уравнений с неизвестными концентрациями металлов – по одному на каждую характеристическую длину волны. В уравнениях учитывали интенсивность холостого опыта, интенсивности флуоресценции каждого металла, поглощение излучения сопутствующими компонентами. Коэффициенты модели оценили по результатам полного факторного эксперимента вида 2^k . Проверили значимость оценок коэффициентов и адекватность модели. Показали связь коэффициентов чувствительности в регрессионных уравнениях и молярной массы определяемых металлов. Установили значительное мешающее влияние отдельных элементов на результаты определения друг друга. Правильность анализа с использованием предложенной методики подтвердили исследованием смешанных модельных растворов и сравнением результатов анализа гальванических стоков с данными альтернативных методов.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, металлы, растворы, полный факторный эксперимент 2^k , гальванические стоки

Для цитирования: Рентгенофлуоресцентное определение ионов железа, меди, никеля, хрома и цинка в водных растворах при совместном присутствии / Р.В. Абражеев, Н.И. Куанчу Нжеуджи, Д.Л. Валькова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 2. С. 83–90. DOI: 10.14529/chem260207

Original article
DOI: 10.14529/chem260207

X-RAY FLUORESCENCE DETERMINATION OF IRON, COPPER, NICKEL, CHROMIUM AND ZINC IONS IN AQUEOUS SOLUTIONS IN MUTUAL PRESENCE

**R.V. Abrazheev[✉], N.I. Kouantchou Njeudji, D.L. Valkova,
O.V. Nipruk, E.V. Elipasheva**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

[✉] abrazheev@chem.unn.ru

Abstract. A method for simultaneous X-ray fluorescence determination of iron, copper, nickel, chromium, and zinc cations in aqueous solutions is proposed. The method uses a mathematical model describing the dependence of the X-ray fluorescence intensity on the sample composition. The model included five equations with unknown concentrations of each metal – one for each characteristic wavelength. The intensity of the blank experiment, the fluorescence intensities of each metal, and the absorption of radiation by accompanying components were taken into account in the equations. The model coefficients were estimated based on the results of a type 2^k full factorial experiment. The significance of the coefficient estimates and

the adequacy of the model were checked. The relationship between the sensitivity coefficients in the regression equations and the molar masses of the determined metals was shown. A significant interfering influence of individual elements on the determination results of each other was established. The correctness of the analysis using the proposed method was confirmed by studying mixed model solutions and comparing the results of the galvanic effluents analysis with data from alternative methods.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, metals, solutions, full factorial experiment 2^k , galvanic effluents

For citation: Abrazheev R.V., Kouantchou Njeudji N.I., Valkova D.L., Nipruk O.V., Elipasheva E.V. X-ray fluorescence determination of iron, copper, nickel, chromium and zinc ions in aqueous solutions in mutual presence. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(2):83–90. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260207

Введение

Современное развитие промышленности и состояние объектов окружающей среды требуют активного контроля состава производственных отходов, сточных вод и выбросов. Важнейшими источниками загрязнителей являются металлургия, транспорт, добыча и переработка полезных ископаемых. Важную роль играют гальванические производства, являющиеся одними из наиболее неэкологичных. Сточные воды этих производств содержат соединения разнообразных металлов, кислоты или щелочи. Металлы, применяемые на гальванических производствах, токсичны и способствуют росту заболеваемости населения в загрязненных регионах. Контроль состава производственных отходов, стоков и выбросов и мониторинг объектов окружающей среды выполняется в аналитических лабораториях, имеющих различную оснащенность и возможности. Разработка методик определения тяжелых металлов, особенно методик многокомпонентного анализа, позволяет облегчить, ускорить и увеличить полноту контроля промышленных стоков.

Цель работы заключалась в разработке методики рентгенофлуоресцентного определения катионов железа, меди, никеля, хрома и цинка в водных растворах при совместном присутствии.

В работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Предложить вид математической модели, описывающей зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции при выбранных длинах волн от концентрации металлов в смешанных растворах.
2. По итогам реализации полного факторного эксперимента вида 2^k рассчитать коэффициенты математической модели, оценить значимость коэффициентов и адекватность модели.
3. Проверить правильность предложенной модели путем анализа модельных смешанных растворов.
4. Применить предложенную модель для анализа реальных объектов и сравнить результаты с данными, полученными другими методами.

Современная аналитическая химия располагает широким спектром аналитических методов, применяемых для количественного определения металлов, как классических, так и инструментальных. Особое внимание в настоящее время уделяется методам, позволяющим проводить одновременное определение нескольких элементов в пробе.

Авторы [1] использовали гравиметрический метод для изучения скорости коррозии *Fe*, *Mo*, *Ni*, *Zr* в расплавленных *KCl* и *NaCl*, а в [2] увеличение массы никелевой подложки использовали для контроля процесса осаждения *Pr* на ее поверхности.

Однако, чувствительность классических методов ограничена, поэтому для определения низких содержаний металлов чаще применяют инструментальные, в частности, спектроскопические методы. Атомно-абсорбционную спектроскопию (ААС) использовали [3] для определения *Cr* в молоке и молочных продуктах в интервале содержаний 0,002-0,4 мкг/кг. Методом ААС с электротермической атомизацией авторы [4] показали накопление *Cu*, *Zn*, *Fe*, *Cd*, *Pb* в тканях почек крыс, подвергнутых интоксикации порошком колчеданной руды, добываемой и перерабатываемой на ряде предприятий Республики Башкортостан. В работе [5] метод ААС применен для изучения поглощения *Cr* корнеплодами репы сорта Петровская после ее некорневой обработки хромовыми квасцами. В статье [6] авторы, используя метод ААС с плазменной атомизацией, определили содержание *Zn*, *Cu*, *Pb*, *Cd*, *Ni*, *Co*, *Fe*, *Mn* в снежном покрове и показали, что пыление

хвостохранилища Урупского ГОКа не оказывает существенного влияния на загрязнение воздуха по конусу выноса.

ААС а также атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) была применена авторами [7] для одновременного определения *Fe, K, Ca, Na, Mg, Mn, Mo, Si, Zn* в куриных и перепелиных яйцах, что позволило более полно и с меньшими затратами определять их показатели качества и безопасности. Методы АЭС и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) использованы в работе [8] для определения *Sn* в воде Азовского и Черного морей. Снижение определяемых концентраций до 10^{-2} мкг/дм³ и уменьшение матричных помех со стороны других металлов достигнуто предварительным восстановлением олова до его гидрида. В [9] метод ИСП-МС использован для детектирования примесей *Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, As, Hg* в фармацевтических растворах интерферона. Этот же метод использован авторами [10] для определения 29 элементов-примесей (в том числе *Ni, Ti, Cr, Co, Cd, Mo, Wo, Bi, Pt, Re, U*) в высокочистом пентакарбониле железа с пределами обнаружения до 10^{-8} %. ИСП-МС был применен для определения *Zn* в инсулиновых препаратах с высокой специфичностью и точностью в диапазоне концентраций 0,4–1,6 мг/л [11]. С помощью этого же метода авторы [12] определяли ряд металлов в почвах и показали превышение содержания ионов *Cr* и *Pb* над нормативами ПДК. Широкий спектр тяжелых металлов в снежном покрове тундры определили авторы [13]. Не выявив превышения нормативов, они установили значимую связь между содержаниями *Fe* и *Cu, Cr* и *Ni, As* и *Mn*, а также *V, Co* и *As*, что свидетельствует о единых источниках поступления данных металлов в снег.

Актуальным для одновременного определения нескольких металлов в пробе является и рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Этот метод использован для определения *Ca* и *Mg* в доломитах [14]. Определение следовых количеств *Fe* и *Cr* в сверхтонкой алюминиевой фольге выполнено автором [15]. Эксперименты выявили занижение результатов вследствие самопоглощения, которое предложено снизить, учитывая толщину фольги. Исследование методом РФА алюминиевых сплавов [16], применяемых для катодной защиты газотурбинных установок, позволило установить содержание в них *Fe, Ni, Cu, Mg, Cr, Co, Y*. Используемые градуировочные зависимости учитывали как наложение сигналов от сопутствующих металлов, так и межэлементные влияния в матрице. Определение *Fe, Co, Cu, Zn, Pb* в каучуках на уровне 10^{-4} % а также ряда других элементов выполнено в [17]. Для повышения чувствительности рентгенофлуоресцентного определения *Ni, Co* и *Cu* в морской воде авторами [18] предложено использовать экстракцию в форме диэтилдитиокарбаматных комплексов с последующей реэкстракцией, что позволило достичь предела обнаружения 0,2 мкг/л. В статье [19] предложено сочетать катодное выделение *Mo* из анализируемого раствора в присутствии металлов-соосадителей и его рентгенофлуоресцентное определение непосредственно на катоде. В работе [20] представлены результаты использования метода РФА для анализа металлоотходов, по итогам которых проанализированные образцы отнесены к конкретным маркам сплавов.

Определение широкого круга металлов (в том числе *Na, Mg, Al, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ba, Pb*) и ряда неметаллов методами РФА и АЭС-ИСП в каменном угле и каменноугольном коксе, а также расчет зольности образцов проведен в работе [21]. Показано, что метод РФА дает результаты, близкие к данным гравиметрического анализа исследованных образцов. В исследовании [22] представлены результаты определения металлов (в том числе *Fe, Mn, Cr, Ti, V, Ni, Cu, Pb, Zn* и др.) и ряда неметаллов в археологических находках охры и возможного сырья для изготовления пигмента, а также образцов вмещающих почв. В работе [23] представлены результаты анализа полимерных упаковок пищевых продуктов. Методом РФА установлено содержание *Al, Ca* и *Ti*, что свидетельствует о присутствии в них наполнителей, таких, как каолинит и кальцит, пигмента – оксида титана, а также *Sb*, применяемой в качестве катализатора.

Электрохимические методы также применяются при определении ионов металлов в водных средах. Так, в [24] исследованы условия и предложена методика определения ионов *Pb* методом инверсионной вольтамперометрии в широком интервале концентраций 10^{-7} – 10^{-1} моль/л. Авторы [25] разработали вольтамперометрическую методику одновременного определения ионов *Cu* и *Ni* в кислых неорганических жидких отходах и методику определения хрома. Для повышения селективности определения к фоновому электролиту предложено добавлять диметилсульфоксид.

Экспериментальная часть

В качестве аналитов выбрали важнейшие металлы, применяемые на гальванических производствах – железо, медь, никель, хром и цинк. Исходными растворами служили стандартные образцы с массовой концентрацией 1,00 г/дм³ железа (III) (ГСО 7835-2000 МСО 0294:2002), меди (ГСО 7836-2000 МСО 0295:2002), никеля (ГСО 7873-2000 МСО 0298:2002), хрома (VI) (ГСО 7834-2000 МСО 0293:2002) и цинка (ГСО 7837-2000 МСО 0296:2002). Анализируемые растворы готовили, смешивая рассчитанные объемы ГСО в мерных колбах и разбавляя 1 моль/л раствором азотной кислоты. Растворы с большими концентрациями готовили, растворяя соответствующие соли (дихромат калия и нитраты других металлов) в азотной кислоте и разбавляя дистиллированной водой, далее – стандартизировали титриметрически. Аликвоту приготовленных растворов объемом 5,0 мл помещали в цилиндрическую фторопластовую кювету, дно которой затянули полипропиленовой пленкой, проницаемой для рентгеновского излучения. Аналитический сигнал (скорость счета в тыс. импульсов в секунду на микроампер – cps/μA) измеряли на рентгенофлуоресцентном спектрометре Shimadzu EDX-900. Время экспозиции – 100 с. Управление прибором, задание условий измерения, сбор и обработку результатов проводили с помощью установленного на персональном компьютере программного обеспечения. Полученные результаты фиксировали.

Обсуждение результатов

Использование рентгенофлуоресцентного метода анализа в настоящей работе связано с возможностью одновременного определения нескольких аналитов в одной пробе, малым влиянием химической формы определяемого элемента на интенсивность флуоресценции, простоте подготовки образца к анализу и его экспрессности. Особенностью РФА является значительный матричный эффект, который необходимо учитывать при анализе сложных по элементному составу объектов. С этой целью была предложена модель, связывающая интенсивность рентгеновской флуоресценции I^{λ_i} смешанного раствора (содержащего металл-аналит i и сопутствующие металлы j), измеренную при характеристической длине волны аналита λ_i , и концентрации металлов в смешанном анализируемом растворе:

$$I^{\lambda_i} = a_i^{\lambda_i} + b_i^{\lambda_i} C_i + \sum_j b_{j,i}^{\lambda_i} C_j - \sum_j z_{j,i}^{\lambda_i} C_i C_j.$$

Первое слагаемое в правой части уравнения определяет величину холостого опыта, второе – интенсивность флуоресцентного излучения аналита при выбранной длине волны. Первая сумма Σ характеризует интенсивность флуоресцентного излучения сопутствующих металлов при длине волны флуоресценции аналита. Вторая сумма определяется поглощением характеристического излучения аналита сопутствующими металлами. При анализе смешанного раствора, содержащего 5 металлов, уравнение в общем случае содержит 10 коэффициентов. Для определения каждого металла составляли аналогичное уравнение при его характеристической длине волны рентгеновского излучения, таким образом, модель содержала пять уравнений с пятью неизвестными – концентрациями металлов.

Для оценки коэффициентов в уравнениях спланировали и реализовали полный факторный эксперимент (ПФЭ) вида 2^k [26]. Данный подход пригоден для исследования сложных систем, поскольку позволяет формализовать процедуру приготовления образцов, уменьшить число экспериментов, необходимых для оценки коэффициентов модели и использовать для обработки результатов простые алгебраические формулы. Число k равно числу определяемых металлов, т. е. 5, общее число независимых экспериментов N равно 32.

Для выбора центра плана для каждого исследуемого металла приготовили серию растворов с уменьшающейся молярной концентрацией в интервале 10^{-4} – 10^{-1} моль/л. Интенсивность флуоресценции каждого раствора измеряли при длинах волн K_{α} соответствующих элементов (табл. 1).

Результаты показали, что трехкратное и больше превышение аналитического сигнала по сравнению со стандартным отклонением сигнала холостого опыта (т. е. полезный аналитический сигнал) наблюдается при концентрациях выше $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л по всем металлам. Исходя из этого, за центр плана выбрали молярную концентрацию каждого металла, равную 0,0100 моль/л и интервал варьирования, равный 0,0040 моль/л.

Таблица 1
Условия определения элементов методом РФА на EDX-900*

Элемент	Энергия аналитической линии, кэВ	Аналитический интервал, кэВ
<i>Cr</i>	5,42	5,22–5,62
<i>Fe</i>	6,40	6,20–6,60
<i>Ni</i>	7,48	7,28–7,68
<i>Cu</i>	8,04	7,84–8,24
<i>Zn</i>	8,64	8,44–8,84

* Элементы упорядочены по возрастанию энергии аналитической линии.

Записали ортогональную матрицу планирования для 5 факторов (концентрации исследуемых металлов) и реализовали 32 независимых эксперимента, задавая концентрации металлов в анализируемых растворах на «верхнем уровне» 0,0140 моль/л и на «нижнем уровне» – 0,0060 моль/л.

Эксперименты выполняли в порядке, задаваемом с помощью генератора случайных чисел, для снижения влияния посторонних систематических причин. Каждый независимый эксперимент повторяли трижды и за результат брали среднее арифметическое.

Коэффициенты в уравнениях регрессии для каждого металла рассчитывали по формулам:

$$a_i = \frac{\sum_i I^{\lambda_i}}{N},$$

$$b_i = \frac{\sum_i (C_i \cdot I^{\lambda_i})}{N},$$

$$b_{j,i} = \frac{\sum_i (C_j \cdot I^{\lambda_i})}{N},$$

$$z_{j,i} = \frac{\sum_i (C_i \cdot C_j \cdot I^{\lambda_i})}{N},$$

где C_i и C_j – концентрации аналита и сопутствующих металлов в кодированных единицах (+1 на верхнем уровне и –1 на нижнем), N – общее число независимых опытов, $N = 32$.

Провели оценку значимости найденных коэффициентов регрессионных уравнений. Для этого рассчитали доверительные интервалы коэффициентов и сравнили полученные значения с коэффициентами, взятыми по модулю. Если доверительный интервал превышал значение коэффициента, его полагали статистически незначимым и в дальнейшем не учитывали.

Адекватность полученных регрессионных уравнений подтвердили, сравнив отношение дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости с критическим значением критерия Фишера. Для дополнительной экспериментальной проверки регрессионных уравнений измерили интенсивности рентгеновской флуоресценции смешанных растворов с концентрациями каждого металла $2,0 \cdot 10^{-3}$, $1,0 \cdot 10^{-2}$ либо $5,0 \cdot 10^{-2}$ моль/л. Расхождение полученных экспериментальных данных и рассчитанных по уравнениям регрессии значений не превысило 5 %, что подтверждает пригодность разработанной модели.

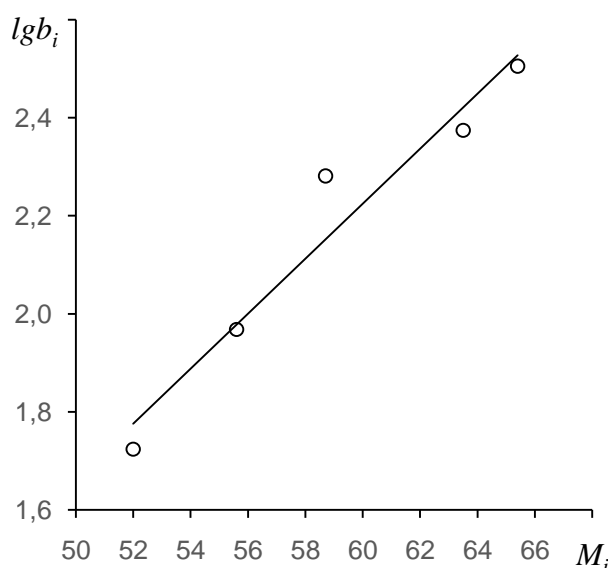
Раскодировали регрессионные уравнения, представив их как зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции от молярной концентрации металлов в растворе.

Коэффициенты $a_i^{\lambda_i}$ по всем металлам оказались одного порядка и не превысили величины 0,05, что экспериментально подтверждается малыми величинами интенсивности холостого опыта. Раскодированные значения коэффициентов b_i представлены в табл. 2.

Таблица 2
Коэффициенты b_i регрессионных уравнений, связывающих интенсивность рентгеновской флуоресценции и молярные концентрации ионов металлов в смешанных растворах (ПФЭ 2^k с концентрацией в центре плана 0,0100 моль/л)

Металл i	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>
b_i	92,8	237	191	53,5	320

Эти коэффициенты иллюстрируют взаимосвязь между чувствительностью определения названных металлов и их молярной массой (см. рисунок), что согласуется с теоретическими предположениями рентгенофлуоресцентного анализа.



Зависимость десятичных логарифмов коэффициентов b_i модели от молярной массы определяемого металла в смешанных водных растворах (EDX-900, линии K_{α} , время экспозиции 100 с)

Коэффициенты $b_{j,i}^{\lambda_i}$ и $z_{j,i}^{\lambda_i}$ оказались статистически незначимыми, за исключением $z_{Cu,Ni}^{\lambda_{Ni}} = 3,7 \cdot 10^3$ и $z_{Cr,Cu}^{\lambda_{Cu}} = 3,3 \cdot 10^3$. Из этих значений следует, что при равных концентрациях присутствие меди занижает результаты определения никеля на 20 %, и присутствие хрома занижает результаты определения меди на 14 %. Предложенная в работе модель позволяет учесть этот матричный эффект.

С помощью предложенной методики и рассчитанной регрессионной модели выполнили анализ неочищенных стоков ООО «Гальванотех». Полученные результаты сравнили с данными лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по ПФО» (табл. 3).

Таблица 3

Результаты анализа неочищенных стоков ООО «Гальванотех» (n = 3, P = 0,95)

Определяемый металл	Определено по предлагаемой методике, мг/дм ³	Определено в лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по ПФО», мг/дм ³
Медь	160 ± 3	158 ± 8
Хром (VI)	610 ± 10	588 ± 29

Доверительные интервалы содержаний меди и хрома перекрываются, что говорит об их правильности и пригодности разработанного подхода для одновременного определения нескольких металлов в гальванических стоках.

Выводы

1. Предложили математическую модель, связывающую интенсивность рентгеновской флуоресценции смешанных растворов железа, меди, никеля, хрома и цинка и концентрации металлов в образцах, учитывающую собственную флуоресценцию, флуоресценцию сопутствующих компонентов и поглощение собственной флуоресценции сопутствующими компонентами в смешанных растворах.

2. Для оценки коэффициентов модели спланировали и реализовали полный факторный эксперимент 2^k с водными растворами, содержащими одновременно катионы названных металлов.
3. Проверили статистическую значимость коэффициентов модели.
4. Подтвердили адекватность модели с помощью критерия Фишера.
5. Проверили правильность предложенной методики многокомпонентного рентгенофлуоресцентного анализа на смешанных модельных растворах и стоках гальванического производства.

Список источников

1. Малых М.А., Абрамов А.В., Половов И.Б. и др. // Междунар. науч.-исслед. журн. 2025. № 10(160)S. С. 1. DOI: 10.60797/IRJ.2025.160s.19.
2. Чернова О.В., Жуковин С.В. // Расплавы. 2021. № 6. С. 565. DOI: 10.31857/S0235010621060025.
3. Афонькина С.Р., Усманова Э.Н., Аллаярова Г.Р. и др. // Эпоха науки. 2024. № 40. С. 463. EDN: QKFWUS.
4. Ильясова Р.Р., Саптарова Л.М., Когина Э.Н. и др. // Вестник БашГУ. 2019. Т. 24, № 1. С.76. EDN: DCPREK.
5. Елисеева О.В., Елисеев А.Ф., Белоухов С.Л. // Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 61, № 2. С. 46. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-61-2-46.
6. Мовсесова В.В., Блужина А.С., Иваненко К.И., Степанян А.А. // Наука. Инновации. Технологии. 2018. № 2. С. 139. EDN: YAJMYH.
7. Мотина Н.В., Савинкова И.П., Громов И.Ю. и др. // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Научно-техническое обеспечение эффективности и качества производства продукции АПК». 2019. С. 166. DOI: 10.30975/978-5-9909889-2-7-2019-1-1-166-175.
8. Темердашев З.А., Абакумов П.Г., Абакумова Д.Д. // Аналитика и контроль. 2022. Т. 26, № 2. С.119. DOI:10.15826/analitika.2022.26.2.002.
9. Берилло Д.А., Жаңабай Ж. // Вестн. Казах. нац. мед. ун-та. 2022. № 2. С. 40. DOI: 10.53065/kaznmu.2022.56.62.003.
10. Стешин М.О., Потапов А.М., Буланов А.Д. и др. // Аналит. и контроль. 2019. Т. 23, № 1. С. 71. DOI:10.15826/analitika.2019.23.1.014.
11. Швецова Ю.Н., Ерина А.А., Хорольская Е.А. и др. // Ведомости науч. центра экспертизы средств мед. примен. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2023. Т. 13, № 3. С. 394-402. DOI: 10.30895/1991-2919-2023-13-3-394-402
12. Мамедова М., Зиёдуллаева У., Сманова З., Абдуллаева М. // Universum: химия и биология. 2025. № 9-2(135). С. 17. DOI: 10.32743/UniChem.2025.135.9.20760
13. Котова Е.И., Пучков А.В., Яковлев Е.Ю., Иванченко Н.Л., Бедрин Д.Д. // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. Т. XXXII, № 3-4. С. 58. DOI: 10.21513/0207-2564-2021-3-4-58-70.
14. Аглиуллина Р.А., Ахметзянова З.В., Иванов Г.В. и др. // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 5. С. 139. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-5-139-148.
15. Способ рентгенофлуоресцентного определения содержания примесей металлов в тонких металлических фольгах: пат. RU 2781625 С2, Россия / Калинин Б.Д. // Изобретения. Полезные модели. 2022. № 29. EDN: GUBQNU.
16. Алексеев А.В., Орлов Г.В., Петров П.С. // Труды ВИАМ. 2022. № 2(108). С.133. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-133-141.
17. Махиянов Н., Сахабутдинов А.Г. // Каучук и резина. 2019. Т. 78, № 2. С. 88. EDN: WQXXGM.
18. Малков А.В., Кожевников А.Ю., Косяков Д.С. и др. // Ж. аналит. химии. 2017. Т. 72, № 6. С. 521-529. DOI: 10.7868/S004445021706010X.
19. Абаева Е.А., Кузнецов В.В., Шакуров Р.И. // Науч. исследования XXI века. 2021. № 3 (11). С. 12. EDN: WPEJTH.
20. Агеева Е.В., Локтионова О.Г., Улитин Д.А. // Изв. ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 20. DOI: 10.21869/2223-1528-2023-13-4-20-31.
21. Алов Н.В., Шаранов П.Ю. // Журнал аналитической химии. 2015. Т. 70, № 12. С. 1288. DOI: 10.7868/S0044450215120026.

22. Юдина Е.А., Тонкушина М.О., Кулеш Н.А. и др. // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Геоархеология. Этнология. Антропология. 2017. Т. 19. С. 103. EDN: YTPPSN.

23. Опперман У. // Аналитика. 2018. Т. 8, № 5 (42). С. 444. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.08.5.444.447.

24. Шелепенко В.В., Смирнова И.В. // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2024. № 4. С. 23. EDN:IVEKNG

25. Трубачева Л.В., Лоханина С.Ю., Трубачев А.В. // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, №3. С. 366. DOI: 10.15350/17270529.2021.3.33.

26. Вершинин В.И., Перцев Н.В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 236 с.

Абражеев Ростислав Владиславович – кандидат химических наук, доцент по специальности «Аналитическая химия, доцент кафедры аналитической и медицинской химии химического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: abrajheev@chem.unn.ru

Куанчу Нжеуджи Нати Ингрид – аспирант, кафедра аналитической и медицинской химии химического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: Kouantchounathyingrid@gmail.com

Валькова Дарья Леонидовна – студент, кафедра аналитической и медицинской химии химического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: valkova2000@gmail.com

Нипрук Оксана Валентиновна – доктор химических наук, профессор по специальности «Аналитическая химия», профессор кафедры аналитической и медицинской химии химического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: nipruk@yandex.ru

Елипашева Елена Валерьевна – кандидат химических наук, доцент по специальности «Аналитическая химия, доцент кафедры аналитической и медицинской химии химического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: shlena@bk.ru

*Статья поступила в редакцию 3 февраля 2026 г.
The article was submitted 3 February 2026.*