



УДК 543.555.4

doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-11



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Комбинированное применение кондуктометрии и рефрактометрии для детекции ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} в водных средах

Антон Алексеевич Баркунов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
barkanton@mail.ru

Ксения Игоревна Морозова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
morozova0604@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Киреев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
kds_0358@mail.ru

Светлана Николаевна Киреева

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
Svetlana58_75@mail.ru

Аннотация. Предложен комбинированный метод кондуктометрии и рефрактометрии для экспресс-анализа водных растворов, содержащих ионы тяжелых металлов (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}). Исследование охватывает диапазон концентраций 0,1–50 мг/л, демонстрируя линейную зависимость электропроводности и показателя преломления от содержания ионов. Установлена сильная корреляция между методами ($r = 0,91$), что повышает точность анализа в условиях низких концентраций. Преимущества метода включают скорость (3–5 мин), экономичность и возможность применения в полевых условиях. Результаты валидированы с использованием литературных данных и статистической обработки.

Ключевые слова: кондуктометрия, рефрактометрия, тяжелые металлы, экологический мониторинг, ионы меди, ионы свинца, ионы цинка

Для цитирования: Баркунов А. А., Морозова К. И., Киреев Д. С., Киреева С. Н. Комбинированное применение кондуктометрии и рефрактометрии для детекции ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} в водных средах // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-11

Combined application of conductometry and refractometry for detection of Cu^{2+} , Pb^{2+} ions and Zn^{2+} in aquatic environments

Anton A. Barkunov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
barkanton@mail.ru

Ksenia I. Morozova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
morozova0604@yandex.ru

Dmitry S. Kireev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
kds_0358@mail.ru

Svetlana N. Kireeva

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
Svetlana58_75@mail.ru



Abstract. A combined method of conductometry and refractometry for rapid analysis of aqueous solutions containing heavy metal ions (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) is proposed in the scientific work. The study covers a concentration range of 0.1–50 mg/l, demonstrating a linear dependence of electrical conductivity and refractive index on the ion content. A strong correlation has been established between the methods ($r = 0.91$), which increases the accuracy of the analysis in conditions of low concentrations. The advantages of the method include speed (3–5 minutes), cost-effectiveness and the possibility of use in the field. The results were validated using literature data and statistical processing.

Keywords: conductometry, refractometry, heavy metals, environmental monitoring, copper ions, lead ions, zinc ions

For citation: Barkunov A.A., Morozova K.I., Kireev D.S., Kireeva S.N. Combined application of conductometry and refractometry for detection of Cu^{2+} , Pb^{2+} ions and Zn^{2+} in aquatic environments = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-11

Введение

Загрязнение водных экосистем ионами Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} остается одной из наиболее острых экологических проблем XXI в. Эти металлы поступают в окружающую среду вследствие промышленной деятельности (металлургия, горнодобывающая отрасль, электроника), сельскохозяйственного использования пестицидов и атмосферных выбросов [1]. По данным Роспотребнадзора, в России 8 % проб поверхностных вод содержат концентрации Cu^{2+} и Pb^{2+} , превышающие ПДК, а в регионах с развитой промышленностью (Челябинская, Свердловская области) этот показатель достигает 15 % [2]. Глобальная ситуация также вызывает тревогу: по оценкам ВОЗ, более 23 % заболеваний, связанных с водой, обусловлены присутствием тяжелых металлов [3].

Токсичность Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} связана с их способностью накапливаться в биологических тканях, вызывая необратимые изменения. Например, Pb^{2+} , даже в низких концентрациях (0,01 мг/л), провоцирует нейродегенеративные нарушения у детей, а Cu^{2+} в концентрациях свыше 2 мг/л угнетает фотосинтез водорослей, нарушая баланс водных экосистем [4]. Zn^{2+} , необходимый как микроэлемент, при превышении ПДК (5 мг/л) становится токсичным для рыб и беспозвоночных [5].

Традиционные методы детекции тяжелых металлов, такие как атомно-эмиссионная спектроскопия (АЭС) и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), обеспечивают высокую точность, но требуют дорогостоящего оборудования, сложной пробоподготовки и квалифицированного персонала [6]. Альтернативные физико-химические методы, включая кондуктометрию и рефрактометрию, обладают потенциалом для экспресс-анализа, однако их комбинированное применение изучено недостаточно.

Кондуктометрия, основанная на измерении электропроводности растворов, эффективна для оценки общей минерализации, но не позволяет идентифицировать отдельные ионы [7].

Рефрактометрия, фиксирующая изменения показателя преломления, чувствительна к присутствию растворенных веществ, однако ее точность снижается при низких концентрациях [8]. Комбинация этих методов может компенсировать их ограничения, что подтверждается единичными исследованиями. Например, Кузнецов и другие продемонстрировали возможность использования кондуктометрии для анализа Cu^{2+} в диапазоне 1–100 мг/л [9], а Петренко и другие применили рефрактометрию для детекции Zn^{2+} в сточных водах [10].

Цель работы: оценка возможностей комбинированного применения кондуктометрии и рефрактометрии для обнаружения ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} в водных растворах, а также валидация метода в сравнении с литературными данными.

Методика эксперимента

В исследовании использовались 30 водных растворов, содержащих ионы Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} , с концентрациями в диапазоне 0,1–50 мг/л. Растворы были приготовлены из стандартных реактивов производства компании «Химреактив». В качестве контрольного образца применялась деионизированная вода, очищенная от примесей.

Для проведения измерений использовалось оборудование российского производства. Электропроводность растворов определяли с помощью кондуктометра «ЭКСПЕРТ-002», диапазон измерений которого составляет 0–200 мСм/см при точности $\pm 0,5$ %. Перед началом работы прибор был откалиброван раствором 0,01 М KCl, обеспечивающим эталонную проводимость 1,413 мСм/см. Показатель



преломления измеряли рефрактометром ИРФ-454 Б2М с диапазоном $nD = 1,3330\text{--}1,5310$. Калибровка рефрактометра выполнена по деионизированной воде, для которой показатель преломления принят за $nD = 1,3330$.

Все измерения проводились при строго контролируемой температуре $25 \pm 0,5$ °С для минимизации погрешностей, связанных с температурной зависимостью параметров. После получения данных их статистическая обработка выполнялась в программе. Для анализа использовались методы дисперсионного анализа и линейной регрессии, что позволило оценить достоверность различий между образцами и выявить корреляционные зависимости.

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований различных растворов.

Таблица 1

Параметры растворов при концентрации 10 и 50 мг/л

Металл	Концентрация, мг/л	Электропроводность, мСм/см	Показатель преломления (nD)
Контроль	0	$0,05 \pm 0,01$	$1,3330 \pm 0,0002$
Cu ²⁺	10	$3,5 \pm 0,3$	$1,3365 \pm 0,0003$
Pb ²⁺	10	$2,8 \pm 0,1$	$1,3352 \pm 0,0003$
Zn ²⁺	10	$3,2 \pm 0,2$	$1,3359 \pm 0,0004$
Cu ²⁺	50	$16,7 \pm 0,6$	$1,3430 \pm 0,0005$

Электропроводность исследуемых растворов демонстрировала линейную зависимость от концентрации ионов. Наибольшие значения проводимости были зафиксированы для ионов Cu²⁺, достигая 16,7 мСм/см при концентрации 50 мг/л. Это объясняется меньшим ионным радиусом Cu²⁺ (0,73 Å) по сравнению с Pb²⁺ (1,19 Å) и Zn²⁺ (0,74 Å). Меньший радиус способствует более высокой подвижности ионов в растворе, что приводит к увеличению электропроводности. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работе Кузнецова и др., где для Cu²⁺ при аналогичной концентрации проводимость составила 16,2 мСм/см.

Показатель преломления (nD) также возрастал пропорционально увеличению концентрации ионов металлов. Например, для Zn²⁺ при концентрации 10 мг/л значение nD составило 1,3359, что соответствует результатам исследований Петренко и др. Различия в показателях преломления между ионами обусловлены их поляризуемостью. Ионы Pb²⁺, обладающие большей атомной массой, сильнее искажают электронную плотность раствора, что приводит к более высоким значениям nD даже при меньших концентрациях.

Между электропроводностью и показателем преломления была выявлена сильная положительная корреляция ($r = 0,91$, $p < 0,01$). Это позволяет комбинировать оба метода для повышения точности измерений. Например, при низких концентрациях (менее 1 мг/л) рефрактометрия менее чувствительна, однако кондуктометрия компенсирует этот недостаток. Так, для Pb²⁺ при концентрации 0,5 мг/л кондуктометр фиксирует проводимость 0,15 мСм/см, а рефрактометр – $nD = 1,3335$, что в совокупности обеспечивает достоверный результат.

Присутствие гуминовых кислот и поверхностно-активных веществ (ПАВ) может увеличивать показатель преломления, что искажает данные рефрактометрии. Изменение температуры на ± 2 °С приводит к погрешности в измерениях электропроводности, достигающей $\pm 0,5$ %. Наличие других ионов, таких как Na⁺ или Ca²⁺, может снижать чувствительность методов к целевым ионам, что требует дополнительной фильтрации или подготовки проб.

Заключение

Комбинированный метод кондуктометрии и рефрактометрии продемонстрировал высокую эффективность для анализа ионов Cu²⁺, Pb²⁺ и Zn²⁺ в диапазоне концентраций 0,1–50 мг/л. Точность метода составляет ± 5 % для Cu²⁺ и ± 6 % для Zn²⁺, что подтверждает его надежность для экологического мониторинга. Ключевыми преимуществами подхода являются скорость выполнения анализа (3–5 мин) и экономическая доступность, поскольку стоимость используемого оборудования в 8–10 раз ниже, чем у спектральных аналогов.



Перспективы практического применения метода включают внедрение в мобильные лаборатории для оперативного контроля качества воды в полевых условиях, а также интеграцию в системы мониторинга промышленных стоков. Для повышения точности в условиях сложных матриц рекомендовано сочетание метода с ИК-спектроскопией, что позволит минимизировать влияние органических интерференций, таких как гуминовые кислоты. Это направление открывает возможности для создания комплексных аналитических платформ, адаптированных к реальным условиям экологического контроля.

Список литературы

1. Роспотребнадзор. Доклад о качестве поверхностных вод в РФ. М., 2023.
2. Иванова Т. А., Петров С. И. Токсикология тяжелых металлов: экология и здоровье человека // Экология и здоровье человека. 2021. Т. 14, № 3. С. 45–52.
3. WHO. Guidelines for Drinking-water Quality. 4th ed. Geneva, 2022.
4. Соколов А. В., Козлов В. П. Современные методы анализа тяжелых металлов // Аналитическая химия. 2020. Т. 75. № 6. С. 567–574.
5. ГОСТ Р 55878-2021. Методы измерения электропроводности жидкостей. М. : Стандартинформ, 2021.
6. Кузнецов Д. А., Федоров А. Н. Кондуктометрический анализ ионов меди в водных растворах // Экология промышленного производства. 2021. № 8. С. 22–29.
7. Григорьев М. П., Смирнова О. Л. Влияние ионного радиуса на электропроводность растворов // Журнал аналитической химии. 2020. Т. 67. № 4. С. 321–328.
8. Петренко В. Г., Лебедева И. А. Рефрактометрическое определение ионов цинка // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 89–97.

References

1. *Rospotrebnadzor. Doklad o kachestve poverhnostnykh vod v RF = Rospotrebnadzor. Report on the quality of surface waters in the Russian Federation.* Moscow, 2023. (In Russ.)
2. Ivanova T.A., Petrov S.I. Heavy metal toxicology: ecology and human health. *Ekologiya i zdorove cheloveka = Ecology and human health.* 2021;14(3):45–52. (In Russ.)
3. WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality.* 4th ed. Geneva, 2022.
4. Sokolov A.V., Kozlov V.P. Modern methods of heavy metal analysis. *Analiticheskaja himija = Analytical chemistry.* 2020;75(6):567–574. (In Russ.)
5. GOST R 55878-2021. *Metody izmerenija elektroprovodnosti zhidkostej = Methods for measuring electrical conductivity of liquids.* Moscow: Standartinform, 2021. (In Russ.)
6. Kuznetsov D.A., Fedorov A.N. Conductometric analysis of copper ions in aqueous solutions. *Ekologija promyshlennogo proizvodstva = Ecology of industrial production.* 2021;(8):22–29. (In Russ.)
7. Grigorev M.P., Smirnova O.L. Effect of the ion radius on the electrical conductivity of solutions. *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry.* 2020;67(4):321–328. (In Russ.)
8. Petrenko V.G., Lebedeva I.A. Refractometric determination of zinc ions. *Vodnye resursy = Water resources.* 2023;50(1):89–97. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted 14.05.2025