



# Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>  
 editorial e-mail: [chem.dnu@gmail.com](mailto:chem.dnu@gmail.com)



UDC 543.422.5:[546.56+546.47+546.74]

## ATOMIC ABSORPTION AND ATOMIC EMISSION WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA DETERMINATION OF COPPER, ZINC, NICKEL IN PHARMACEUTICAL SUBSTANCES

Oleg I. Yurchenko, Tetiana V. Chernozhuk, Oleksii A. Kravchenko, Olexandr M. Baklanov\*

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

Received 5 August 2025; accepted 19 November 2025; available online 23 March 2026

### Abstract

The influence of nonionic surfactant Triton X-100 on the analytical signal in atomic absorption determination of copper, zinc, and nickel in pharmaceutical substances was investigated. The sensitivity and precision of analyte determination were increased by using Triton X-100 (w = 4 %) solutions, calibration solutions based on metal acetylacetonates, and treating the analyzed samples with ultrasound for 20 min. The sensitivity of atomic absorption determination of copper increases by 1.80 times, zinc by 1.60 times, and nickel by 1.70 times. The content of analytes in multicomponent samples was determined by atomic absorption and atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. The results obtained by two independent methods were compared using F- and t-criteria. It was shown that there is no significant discrepancy in these results, the difference is insignificant and is due to random statistical error. The accuracy of the analysis results was verified by varying the sample weight and using the "added-found" method. The detection limit for copper ( $C_{\min} = 0.002 \mu\text{g/ml}$ ,  $C_{\text{lit}} = 0.004 \mu\text{g/ml}$ ), zinc ( $C_{\min} = 0.003 \mu\text{g/ml}$ ,  $C_{\text{lit}} = 0.004 \mu\text{g/ml}$ ), and nickel ( $C_{\min} = 0.003 \mu\text{g/ml}$ ,  $C_{\text{lit}} = 0.004 \mu\text{g/ml}$ ) was calculated by atomic absorption method.

*Keywords:* atomic absorption spectrometry; inductively coupled plasma atomic emission spectrometry; copper; zinc; nickel; Triton X-100; ultrasonic treatment; metal acetylacetonates; pharmaceutical substances.

## АТОМНО-АБСОРБЦІЙНЕ ТА АТОМНО-ЕМІСІЙНЕ З ІНДУКТИВНО-ЗВ'ЯЗАНОЮ ПЛАЗМОЮ ВИЗНАЧЕННЯ МІДІ, ЦИНКУ, НІКЕЛЮ В ФАРМАЦЕВТИЧНИХ СУБСТАНЦІЯХ

Олег І. Юрченко, Тетяна В. Черножук, Олексій А. Кравченко, Олександр М. Бакланов\*

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

### Анотація

Досліджено вплив неіоногенної поверхнево-активної речовини Тритон X-100 на величину аналітичного сигналу під час атомно-абсорбційного визначення міді, цинку та нікелю в фармацевтичних субстанціях. Підвищені чутливість та прецизійність визначення аналітів за рахунок використання розчинів Тритон X-100 (w = 4 %), градувальних розчинів на основі ацетилацетонатів металів та обробці аналізованих зразків ультразвуком протягом 20 хв. Чутливість атомно-абсорбційного визначення міді підвищується в 1.80 рази, цинку – в 1.60 рази, нікелю – в 1.70 рази. Визначений вміст аналітів у багатокомпонентних зразках методами атомно-абсорбційної та атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою. Співставлені результати, отримані двома незалежними методами, за F- та t- критеріями. Показана відсутність значимої розбіжності в цих результатах, несуттєва різниця обумовлена випадковою статистичною погрішністю. Проведена перевірка правильності результатів аналізів шляхом варіювання маси наважки зразку та методом «введено-знайдено». Визначена межа виявлення міді ( $C_{\min} = 0.002 \text{ мкг/мл}$ ,  $C_{\text{літ}} = 0.004 \text{ мкг/мл}$ ), цинку ( $C_{\min} = 0.003 \text{ мкг/мл}$ ,  $C_{\text{літ}} = 0.004 \text{ мкг/мл}$ ), нікелю ( $C_{\min} = 0.0010 \text{ мкг/мл}$ ,  $C_{\text{літ}} = 0.0015 \text{ мкг/мл}$ ) атомно-абсорбційним методом.

*Ключові слова:* атомно-абсорбційна спектроскопія; атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно-зв'язаною плазмою; мідь; цинк; нікель; Тритон X-100; ультразвукова обробка; ацетилацетонати металів; фармацевтичні субстанції.

\*Corresponding author: e-mail: [baklanov\\_oleksandr@meta.ua](mailto:baklanov_oleksandr@meta.ua)

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v34i1.336904

## Вступ

Мідь, цинк та нікель відіграють важливу біологічну роль у організмі людини, але в надмірній кількості навпаки, вони можуть завдавати йому серйозної шкоди. Мідь є дуже важливим для роботи організму елементом. Вона необхідна для обміну вітамінів груп А, В, С, Е, D, виступає каталізатором багатьох внутріклітинних окисно-відновних процесів, входить до складу великої кількості ферментів, ензимів, сприяє утворенню гемоглобіну та має дію, подібну до інсуліну. Надлишок міді може призвести до цирозу печінки, пошкодження нирок, гемолізу через надмірну кількість гемоглобіну [1–4].

Цинк забезпечує роботу більшості органів відчуття, значніше всього впливає на зір та смак. Надлишок цинку погіршує засвоєння інших елементів, що призводить до порушення травлення. За високих концентрацій він накопичується в печінці, нирках та викликає анемію [5–7]. Надлишок нікелю в організмі може призвести до нудоти, ускладнення дихання. Він може порушити синтез білків, розривати ланцюги РНК та ДНК. Велика кількість сполук нікелю відносяться до першої групи канцерогенів [8–10]. Вміст міді, цинку та нікелю ретельно перевіряється в більшості фармацевтичних препаратів. Для визначення цих аналітів використовують сучасні методи аналізу: атомно-абсорбційну спектрометрію, атомно-емісійну спектрометрію з індуктивно-зв'язаною плазмою [11–28].

Необхідну точність та прецизійність визначення аналітів у багатокомпонентних зразках можна досягти шляхом ультразвукової обробки, використання нових середовищ на основі ПАР та ацетилацетонатів металів як стандартних зразків складу [29; 30]. *Мета роботи* – розробити новітню методику атомно-абсорбційного та атомно-емісійного з індуктивно-зв'язаною плазмою визначення аналітів у багатокомпонентних зразках із покращеними метрологічними характеристиками.

## Експериментальна частина

У роботі був використаний атомно-абсорбційний спектрометр іСЕ3500 (полум'яний варіант). Лампи з порожнистими катодами. Умови атомно-абсорбційних вимірювань: мідь –  $C_2H_2$ -повітря збіднене, 1 л/хв  $C_2H_2$ , довжина хвилі 3248 нм; цинк –  $C_2H_2$ -повітря збіднене 1 л/хв  $C_2H_2$ , довжина

хвилі 213.9 нм; нікель –  $C_2H_2$ -повітря збіднене 1 л/хв  $C_2H_2$ , довжина хвилі 232.0 нм. Атомно-емісійний спектрометр з індуктивно-зв'язаною плазмою TRACE SCAN Advantage: мідь – довжина хвилі 324.754 нм; цинк – довжина хвилі 213.856 нм; нікель – довжина хвилі 231.604 нм.

Для визначуванних аналітів потужність плазми становила 1150 Вт, швидкість подачі проби – 1.85 мл/хв, швидкість допоміжного потоку аргону – 1 л/хв. Використовували електронні лабораторні ваги OHAUS PA (65/0.001). Для прискорення розчинення фармацевтичних субстанцій використовували дію ультразвуку в ультразвуковій бані (Codyson) PS20 jeken (120 Вт, частота УЗ 40 кГц). Градувальні розчини готували з використанням стандартних зразків водних розчинів іонів міді, цинку, нікелю виробництва Фізико-хімічного інституту ім. А.В.Богатського (м. Одеса); ацетилацетон; стандартні зразки на основі ацетилацетонатів міді, цинку, нікелю, атестованих рядом підприємств України. Вихідні концентрації розчинів іонів металів для приготування градувальних розчинів 0.1 г/л, Тритон X-100,  $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ ,  $n = 9-10$ ,  $M_v = 631$  г/моль, ККМ =  $2.9 \times 10^4$  моль/л.

Зразки фармацевтичних субстанцій аскорбінової кислоти, хлориду натрію, тальку, парацетамолу надано ТОВ «Фармацевтична компанія Здоров'я».

*Пробопідготовка лікарських субстанцій.* Серію наважок аналізованих проб масою 0.5 г (зважених з похибкою 0.0001 г) переносили в термостійкі стаканчики, додавали по 5 мл конц.  $HNO_3$ , перемішували та випарювали нагріванням на водяній бані до волого залишку. Після охолодження додавали по 5 мл 1.5 %  $HNO_3$ , діяли ультразвуком для досягнення гомогенності розчину. Розчини фільтрували через паперовий фільтр у мірні колби місткістю 25 мл, додавали 2 мл Тритон X-100 ( $w = 4$  %), 0.5 мл ацетилацетону. Об'єм у колбах доводили 1.5 %  $HNO_3$  до риски та ретельно перемішували.

## Результати та їх обговорення

Проблемою чутливості атомно-абсорбційного визначення є низька ефективність розпорошення розчину – використовується лише 3–10 % проби, в той час як решта розчину формує краплі, завеликі для повноцінного випарювання в полум'ї приладу [17]. Для покращення розпорошення

та випаровування проб зазвичай використовували різноманітні органічні розчинники, але їх коштовність та токсичність робить їх непридатними до використання з точки зору «зеленої» хімії. Для підвищення чутливості ми використали розчини поверхнево-активної речовини – Тритон X-100 ( $w = 4\%$ ). Це дозволило знизити поверхневий натяг та густину аналізованих розчинів, збільшити їх дисперсність. Metalli в лікарських препаратах знаходяться в вигляді комплексів з органічними лігандами. Тому використання градувальних розчинів під час визначення аналітів не є доцільним, оскільки за хімічним складом градувальні та аналізовані розчини суттєво відрізняються. Тому ми під час пробопідготовки аналізованих зразків додавали ацетилацетон для утворення ацетилацетонатів аналітів. Для оцінки підвищення чутливості визначення міді, цинку, нікелю градувальні розчини готували із водних розчинів іонів металів та ацетилацетонатів аналітів з додаванням 2 мл розчину Тритону X-100 ( $w = 4\%$ ). Будували залежність аналітичних сигналів ( $A$ ) під час атомно-абсорбційного визначення аналітів від концентрації ( $C$ ) та розраховували підвищення чутливості визначення ( $S$ )

аналітів. Чутливість – це тангенс кута нахилу прямої на градувальному графіку:

$$S = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dA}{dC}. \quad (1)$$

Підвищення чутливості ( $\Delta S$ ) визначали за формулою:

$$\Delta S = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (2)$$

де  $\operatorname{tg} \alpha_1$  – чутливість за використання стандартних зразків складу на основі водних розчинів іонів металів,  $\operatorname{tg} \alpha_2$  – чутливість в ході визначення аналітів після додавання розчину Тритон X-100 до розчинів ацетилацетонатів аналітів.

Встановлено, що чутливість атомно-абсорбційного визначення міді підвищується в 1.80 рази, цинку – в 1.60 рази, нікелю – в 1.70 рази. Для повноти вилучення аналітів з багатокомпонентних зразків та отримання гомогенних розчинів нами використано ультразвукову обробку. Максимальне вилучення досягається після обробки зразків ультразвуком протягом 20 хв. Атомно-абсорбційним та атомно-емісійним з індуктивно-зв'язаною плазмою методами визначений вміст аналітів у фармацевтичних субстанціях (табл. 1, 2).

Table 1

**Determination of copper, zinc, and nickel content in pharmaceutical substances by atomic absorption spectrometry (AAS) (n = 5, P = 0.95).**

Таблиця 1

**Визначення вмісту міді, цинку та нікелю в фармацевтичних субстанціях атомно-абсорбційним методом (AAS) (n = 5, P = 0.95).**

Зразок	c(Cu), мг/кг	S <sub>r</sub>	c(Zn), мг/кг	S <sub>r</sub>	c(Ni), мг/кг	S <sub>r</sub>
Аскорбінова к-та	1.15 ± 0.05	0.03	1.82 ± 0.03	0.02	1.05 ± 0.03	0.02
NaCl	8.98 ± 0.05	0.02	1.95 ± 0.04	0.02	16.44 ± 0.04	0.02
Тальк	8.87 ± 0.06	0.02	3.00 ± 0.06	0.02	2.10 ± 0.04	0.02
Парацетамол	1.19 ± 0.07	0.03	1.63 ± 0.04	0.02	1.07 ± 0.07	0.03

Table 2

**Determination of copper, zinc and nickel content in pharmaceutical substances by atomic emission with inductively coupled plasma (AEC-ICP) method (n = 5, P = 0.95)**

Таблиця 2

**Визначення вмісту міді, цинку та нікелю в фармацевтичних субстанціях атомно-емісійним з індуктивно-зв'язаною плазмою методом (AEC-ІЗП) (n = 5, P = 0.95)**

Зразок	c(Cu), мг/кг	S <sub>r</sub>	c(Zn), мг/кг	S <sub>r</sub>	c(Ni), мг/кг	S <sub>r</sub>
Аскорбінова к-та	1.18 ± 0.03	0.02	1.85 ± 0.02	0.02	1.01 ± 0.04	0.03
NaCl	8.92 ± 0.04	0.02	1.90 ± 0.03	0.02	16.52 ± 0.07	0.02
Тальк	8.79 ± 0.05	0.02	2.97 ± 0.03	0.02	2.08 ± 0.05	0.02
Парацетамол	1.16 ± 0.05	0.03	1.66 ± 0.02	0.02	1.09 ± 0.06	0.03

Проведене співставлення результатів, отриманих двома незалежними методами за F- та t-критеріями (табл. 3).

Table 3

Comparison of the results of the determination of copper, zinc and nickel in pharmaceutical substances by the AAS and AES-IZP methods according to the Fisher and Student criteria ( $f_1 = 4, f_2 = 4, P = 0.95$ )

Таблиця 3

Співставлення результатів визначення міді, цинку та нікелю в фармацевтичних субстанціях методами ААС та АЕС-ІЗП за критеріями Фішера та Стьюдента ( $f_1 = 4, f_2 = 4, P = 0.95$ )

Зразок	Елемент	F	F <sub>табл.</sub>	t <sub>4,4</sub>	t <sub>експ.</sub>
Аскорбінова к-та	Cu	2.78	6.39	0.90	1.86
	Zn	2.25		1.46	
	Ni	1.78		1.40	
NaCl	Cu	1.56		1.65	
	Zn	1.78		1.76	
	Ni	3.06		1.74	
Тальк	Cu	1.44		1.80	
	Zn	4.00		0.79	
	Ni	1.56		0.55	
Парацетамол	Cu	1.96		0.61	
	Zn	4.00		1.18	
	Ni	1.36		0.38	

Показано, що в цих результатах немає значимої розбіжності, різниця є не суттєвою та обумовлена випадковою статистичною погрішністю. Перевірку правильності результатів аналізу проведено методом стандартних добавок. Добавки вводили в

вигляді ацетилацетонатів металів. Пробопідготовку проводили за вище описаною методикою. В табл. 4 наведені результати атомно-абсорбційного визначення аналітів у натрій хлориді методом стандартних добавок.

Table 4

Verification of the results of atomic absorption determination of copper, zinc and nickel in NaCl samples by the standard addition method ( $n = 5, P = 0.95$ )

Таблиця 4

Перевірка правильності результатів атомно-абсорбційного визначення міді, цинку та нікелю в зразках NaCl методом стандартних добавок ( $n = 5, P = 0.95$ )

Елемент	Вміст елементу, мг/кг	Введено, мг/кг	Знайдено, мг/кг	S <sub>r</sub>
Cu	8.92 ± 0.04	8.00	16.98 ± 0.05	0.02
Zn	1.90 ± 0.03	2.00	3.87 ± 0.04	0.02
Ni	16.52 ± 0.07	20.00	36.61 ± 0.03	0.03

Перевірку правильності результатів аналізу проведено також шляхом варіювання маси наважки зразків: від 0.1 до 1.0 г. В обох випадках встановлено, що систематична похибка не є статистично значимою. Оцінено межу виявлення аналітів атомно-абсорбційним методом. Межу виявлення оцінювали вимірюванням аналітичного сигналу (A) 20 холостих розчинів, по 6 паралельних вимірювань для кожного розчину. Оцінку проводили за трисигмовим критерієм. Спочатку було розраховане стандартне відхилення фону:

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{A} - A_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Сама межа виявлення розраховується за формулою:

$$C_{\min, P} = \frac{3S_0}{S} \quad (4)$$

де S - це коефіцієнт чутливості для відповідного аналіту.

Результати досліджень наведені в таблицях 5-7.

Table 5

Estimation of the detection limit  $C_{\min}$  ( $\mu\text{g/ml}$ ) of copper by atomic absorption determination

Таблиця 5

Оцінка межі виявлення $C_{\min}$ (мкг/мл) міді атомно-абсорбційним визначенням									
№ розч.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>сер</sub>	S <sub>0</sub>	C <sub>min</sub> (мкг/мл)
1	3	4	3	4	3	2	3.17	0.144	0.002
2	3	4	3	4	2	3	3.17		
3	3	1	4	3	4	4	3.17		
4	2	3	5	3	4	3	3.33		
5	4	3	4	3	4	3	3.50		
6	2	4	3	4	5	3	3.50		

Продовження табл. 5

7	2	4	3	4	4	2	3.17
8	4	3	2	3	4	4	3.33
9	3	4	3	2	3	5	3.33
10	3	4	2	4	3	3	3.17
11	4	3	2	2	5	4	3.33
12	3	2	4	3	4	3	3.17
13	3	5	4	2	3	3	3.33
14	4	3	4	3	4	3	3.50
15	3	2	3	4	3	4	3.17
16	4	3	4	3	2	4	3.33
17	3	4	2	4	3	2	3.00
18	4	3	2	4	3	3	3.17
19	5	3	4	3	2	4	3.50
20	4	3	4	3	4	2	3.33

$C_{\min}(\text{мкг/мл})_{\text{літ.}} = 0.004$

Table 6

**Estimation of the detection limit  $C_{\min}$  ( $\mu\text{g/ml}$ ) of zinc by atomic absorption determination**

Таблиця 6

**Оцінка межі виявлення  $C_{\min}$  (мкг/мл) цинку атомно-абсорбційним визначенням**

№ розч.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>сер</sub>	S <sub>0</sub>	$C_{\min}(\text{мкг/мл})$
1	3	2	3	2	1	3	2.33	0.280	0.003
2	2	3	1	4	1	3	2.33		
3	1	4	3	4	3	2	2.83		
4	3	3	2	1	3	2	2.33		
5	4	2	1	2	1	3	2.17		
6	2	4	3	2	3	5	3.17		
7	3	2	1	3	2	3	2.33		
8	1	4	2	3	1	2	2.17		
9	4	2	3	2	3	2	2.67		
10	3	2	3	2	3	2	2.50		
11	1	2	1	3	4	2	2.17		
12	3	4	3	2	1	1	2.33		
13	3	3	2	2	3	2	2.50		
14	3	1	4	3	2	1	2.33		
15	2	3	4	2	3	2	2.67		
16	2	4	3	2	3	2	2.67		
17	4	3	1	4	2	1	2.50		
18	3	2	1	4	2	3	2.50		
19	4	2	3	3	3	2	2.83		
20	3	3	2	4	2	4	3.00		

$C_{\min}(\text{мкг/мл})_{\text{літ.}} = 0.004$

Table 7

**Estimation of the detection limit  $C_{\min}$  ( $\mu\text{g/ml}$ ) of nickel by atomic absorption determination**

Таблиця 7

**Оцінка межі виявлення  $C_{\min}$  (мкг/мл) нікелю атомно-абсорбційним визначенням**

№ розч.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>сер</sub>	S <sub>0</sub>	$C_{\min}(\text{мкг/мл})$
1	2	3	1	2	1	2	1.83	0.054	0.0010
2	1	2	1	3	1	3	1.83		
3	1	2	2	3	1	2	1.83		
4	3	1	3	1	3	1	2.00		
5	3	2	1	2	1	2	1.83		
6	4	1	2	1	2	1	1.83		
7	2	1	3	1	2	1	1.67		
8	1	1	3	2	1	3	1.83		
9	2	3	1	2	3	0	1.83		
10	1	3	1	2	1	3	1.83		
11	2	1	2	3	1	2	1.83		
12	2	1	2	1	3	2	1.83		
13	2	1	2	3	1	2	1.83		
14	2	1	2	3	1	2	1.83		
15	2	1	3	1	2	2	1.83		
16	4	2	1	2	1	1	1.83		

$C_{\min}(\text{мкг/мл})_{\text{літ.}} = 0.0015$

Продовження табл. 7							
17	3	2	1	2	1	2	1.83
18	2	1	2	1	2	3	1.83
19	1	2	1	3	3	1	1.83
20	2	1	2	1	2	3	1.83

Отримані межі виявлення аналітів атомно-абсорбційним методом нижчі за відомі з літератури.

### Висновки

Вивчений вплив розчинів Тритон X-100 на підвищення чутливості атомно-абсорбційного визначення аналітів у багатокомпонентних зразках. Розроблена методика атомно-абсорбційного та атомно-емісійного з індуктивно-зв'язаною плазмою визначення міді, цинку та нікелю в фармацевтичних субстанціях із використанням Тритон X-100,

ультразвукової обробки та ацетилацетонатів металів як стандартних зразків складу. Покращені метрологічні характеристики отриманих результатів. Правильність отриманих результатів перевірені методом стандартних добавок, варіюванням маси наважки зразків та співставленням результатів, отриманих двома незалежними методами. Методика визначення аналітів у фармацевтичних субстанціях є експресною та характеризується високою чутливістю, прецизійністю та точністю.

### References

- [1] Jomova, K., Alomar, S. Y., Nepovimova, E. (2025). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Arch. Toxicol.* 99, 153–209. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>
- [2] Araya, M., Olivares, M., Pizarro, F. (2007). Copper in human health. *Int. J. Environ. Health*, 1(4), 608–620. <https://doi.org/10.1504/IJENVH.2007.018578>
- [3] Henriksen, C., Arnesen, E. K. (2023). Copper – a scoping review for Nordic Nutrition Recommendations. *Food Nutr. Res.*, 67. <https://doi.org/10.29219/fnr.v67.10322>
- [4] Eljazzar, S., Abu-Hijleh, H., Alkhatib, D., Sokary, S., Ismail, S., Al-Jayyousi, G. F., Tayyem, R. (2023). The role of copper intake in the development and management of Type 2 diabetes: a systematic review. *Nutrients*, 15(7), 1655. <https://doi.org/10.3390/nu15071655>
- [5] Maywald, M., Rink, L. (2022). Zinc in human health and infectious diseases. *Biomolecules*, 12(12), 1748. <https://doi.org/10.3390/biom12121748>
- [6] Perestiuk, V., Kosovska, T., Volianska, L., Boyarchuk, O. (2025) Association of zinc deficiency and clinical symptoms, inflammatory markers, severity of COVID-19 in hospitalized children. *Front. Nutr.*, 12, 1566505. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1566505>
- [7] Yao, J. H., Ortega, E. F., Panda, P. (2025). Impact of zinc on immunometabolism and its putative role on respiratory diseases. *Immunometabolism (Cobham)*, 7(1), e00057. <https://doi.org/10.1097/in9.0000000000000057>
- [8] Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S., Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(3), 679–700. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- [9] Su, X., Zhang, Z., Qiu, S., Zeng, B., Yang, M., Huang, X., Zou, X., Yang, L. (2023). Association between nickel exposure and body compositions in the United States: a population-based cross-sectional study. *BMC Public Health*, 23, 1632. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-16483-0>
- [10] Duda, A., Błaszczuk, U. (2008). The impact of nickel on human health. *J. Elementology*, 13(4), 685–696. <https://www.researchgate.net/publication/230881017>
- [11] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Shevchenko, I. R., Baklanov, O. M. (2025). Atomic absorption determination of copper in the microalgae *Dunaliella Viridis* and its further use as a therapeutic agent. *Metrology and Instruments*, 1, 60–64. <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2025.1.09> (in Ukrainian)
- [12] Bozhkov, A. I., Bobkov, V. V., Osolodchenko, T. P., Yurchenko, O. I., Ganin V. Y., Ivanov, E. G., Batuiyeva, Y. D., Minukhin, V. V., Goltvianskiy, A. V., Kozheshkurt, V. A., Ponomarenko, S.V. (2024). The antibacterial activity of the copper for *Staphylococcus aureus* 124 and *Pseudomonas aeruginosa* 18 depends on its state: metalized, chelated and ionic. *Heliyon*, 10(20), e39098. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39098>
- [13] Citak, D., Tuzen, M. (2010). A novel preconcentration procedure using cloud point extraction for determination of lead, cobalt and copper in water and food samples using flame atomic absorption spectrometry. *Food Chem. Toxicol.*, 48, 1399–1404. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.03.008>
- [14] Simonova, T. N., Dubrovina, V. A., Vishnikin, A. B. (2016). Speciation of chromium through aqueous two-phase extraction of complexes of Cr(III) with 4-(2-pyridylazo)resorcinol and Cr(VI) with 1,5-diphenylcarbazine. *J. Serb. Chem. Soc.*, 81(6), 645–659. <https://doi.org/10.2298/JSC150630016S>
- [15] Shoaee, H., Roshdi, M., Khanlarzadeh, N., Beiragh, A. (2012). Simultaneous preconcentration of copper and mercury in water samples by cloud point extraction and their determination by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Spectrochim. Acta A*, 98, 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.08.027>
- [16] Li, W., Simmons P., Shrader, D., Herrman, T. J., Dai, S. Y. (2013). Microwave plasma-atomic emission spectroscopy as a tool for the determination of copper, iron, manganese and zinc in animal feed and fertilizer. *Talanta*, 112, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.03.029>
- [17] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Nikolenko, M. V., Baklanov, O. M. (2024). Atomic absorption determination of copper and zinc in pharmaceutical preparations. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (1), 115–121.

- <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-152-1-115-121> (in Ukrainian)
- [18] Geronimo, A. C. R., Melo, E. S. P., Silva, K. R. N., Pereira, H. S., Nascimento, V. A., Machate, D. J., do Nascimento, V. A. (2021). Human health risk assessment of heavy metals and metalloids in herbal medicines used to treat anxiety: Monitoring of safety. *Front. Pharmacol.*, *12*, 772928. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.772928>
- [19] Ribeiro, M. M. A. C., Prado, A. A., Batista, A. D., Munoz, R. A. A., Richter, E. M. (2019). Rapid method for simultaneous determination of ascorbic acid and zinc in effervescent tablets by capillary zone electrophoresis with contactless conductivity detection. *J. Sep. Sci.*, *42*, 754–759. <https://doi.org/10.1002/jssc.201801042>
- [20] Hedjazi, M., Vishnikin, A. B., Okovytyy, S. I., Miekh, Yu. V., Bazel, Ya. R. (2022). Use of dye aggregation phenomenon for spectrophotometric and SIA-LAV determination of bismuth(III) as a specific ion association complex between tetraiodobismuthate and Astra Phloxine. *J. Molec. Struct.*, *1251*, 132015. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.132015>
- [21] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Kravchenko, O. A., Baklanov, A. N. (2022). Atomic absorption and atomic emission with inductive connected plasma and X-ray fluorescent detection of zinc and copper in soil. *J. Chem. Technologies*, *30*(2), 307–311. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.223394> (in Ukrainian)
- [22] Gaddey, P. K., Raja, S. (2024). A method optimization study for atomic absorption spectrometric determination of nickel content in meclizine hydrochloride. *J. Turk. Chem. Soc. Sect. Chem.*, *11*(3), 1073-1080. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1402767>
- [23] Abbas, E. R., Kadhim, S. H., Al-Da'amy, M. A. A. (2013). Determination of Ni(II) in alloy by spectrophotometric method with a new chromogenic reagent (IDPBS). *Int. J. Pharm. Qual. Assur.*, *11*(1), 20–22. <https://doi.org/10.25258/ijpqa.11.1.14>
- [24] Nessa, F., Khan, S. A., Abu Shawish, K. Y. I. (2016). Lead, cadmium and nickel contents of some medicinal agents. *Indian J. Pharm. Sci.*, *78*(1), 111–119. <https://doi.org/10.4103/0250-474x.180260>
- [25] Tsiganok, L. P., Vishnikin, A. B., Maksimovskaya, R. I. (1989). UV, IR, <sup>71</sup>Ga and <sup>17</sup>O NMR spectroscopic studies of 12-molybdogallate. *Polyhedron*, *23*, 2739–2742. [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)80529-X](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)80529-X)
- [26] Al-Taeb, S. A., Al-Tayeb, K. A., Al-Aseer, A. S., Khan, M. M. (2015). Atomic absorption analysis of toxic heavy metal impurities in various commercial Aspirin formulations. *Adv. Biochem.* *3*(1), 9–14. <https://doi.org/10.11648/j.ab.20150301.13>
- [27] Yurchenko, O. I., Gubskii, S. M., Chernozhuk, T. V., Baklanov, A. N., Kravchenko, O. A. (2020). [Monitoring of content of sodium, potassium, calcium and magnesium in whey processed products]. *J. Chem. Technologies*, *28*(1), 27–33 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/082004>
- [28] Lewen, N. (2011). The use of atomic spectroscopy in the pharmaceutical industry for the determination of trace elements in pharmaceuticals. *J. Pharm. Biomed. Anal.* *55*(4), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2010.11.030>
- [29] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Baklanov, A. N., Baklanova, L. V., Kravchenko, O. A. (2018). [Analytical signal amplification technologies in sonoluminescence spectroscopy by double-frequency ultrasound]. *Methods Objects Chem. Anal.*, *13*(3), 103–109. <https://doi.org/10.17721/moca.2018.103-109> (in Russian)
- [30] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Kravchenko, O. A., Baklanov, A. N. (2023). [Atomic absorption and X-ray fluorescent detection of chromium and cobalt in pharmaceuticals]. *J. Chem. Technologies*. *31*(1), 37–43. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i1.238921> (in Ukrainian)