

Скиба М.І.

<https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>

Український державний університет науки і технологій

СИНТЕЗ ТА ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ

У статті здійснено дослідження щодо одержання та стабілізація/функціоналізація поверхні наночастинок золота (НЧ Au) із впливом на їх характеристики (середній розмір НЧ, розподілення за розміром, дзета-потенціал) для забезпечення ефективної взаємодії з сполуками-забрудниками-аналітами харчових продуктів та питної води при колориметричному визначенні. Для варіювання характеристик наночастинок було використано сучасні методи синтезу: плазмохімічний синтез із різними типами стабілізаторів/функціоналізаторів (цитрат натрію, карбокисметил целюлоза, полівініловий спирт, екстракт жому винограду та синтез екстрактом жому (банану), одержаними із використанням «зеленого» низькотемпературного евтектичного розчинника (холін хлорид-гліцерол). Продемонстровано, що одержані НЧ Au характеризуються піком лінії ППР $\lambda=520-530$ нм, $d_{ср}=20-55$ нм з розподіленням за розміром до 100 нм, ζ -потенціалом $-21,7-43,5$ мВ залежно від типу стабілізатора та способу синтезу. Як модельні сполуки-забрудники-аналіти харчових продуктів та питної води були використано гістамін та іони хрому. Встановлено, що при колориметричному виявленні поліютантів УФ-видимий спектр всіх одержаних Au НЧ демонстрував червоний зсув та зменшення інтенсивності піку поверхневого плазмонного резонансу (ППР) при $\lambda=530$ нм разом з появою піку $\lambda=650-700$ нм, що свідчить про агрегаційний механізм Au НЧ виявлення поліютантів. Встановлено, що тип стабілізатора має визначальне значення і впливає на колориметричну чутливість при близьких значеннях розміру НЧ. Межі виявлення (LOD) і кількісного визначення (LOQ) для виявлення гістаміну становлять 23,2–29,9 мг/л і 60,1–90,7 мг/л; 19,8–29,9 мг/л і 60,1–90,7 мг/л; залежно від типу стабілізатора/функціоналізатора для виявлення гістаміну. Встановлено, що вибір стабілізатора наночастинок безпосередньо впливає на чутливість колориметричної сенсорної системи.

Ключові слова: наночастинок, модифікація, плазмовий розряд, низькотемпературний евтектичний розчинник, екстракт, сенсор, колориметричний аналіз, оптичні методи аналізу, поліютант, водне середовище.

Постановка проблеми. Розвиток нанотехнологій упродовж останніх десятиліть зумовив суттєвий прогрес у створенні функціональних матеріалів із заданими фізико-хімічними характеристиками. Особливе місце серед них посідають наноматеріали, властивості яких істотно відрізняються від об'ємних матеріалів унаслідок розмірних ефектів [1, 2]. Ці особливості визначають унікальні властивості наноматеріалів, що зумовлює їх широке застосування у різних галузях включно з сучасними технологіями аналітичного визначення поліютантів. Інтеграція наноматеріалів сенсори дала змогу істотно підвищити чутливість, селективність і межі виявлення аналітів порівняно з традиційними сенсорними системами [3, 4].

Серед різноманіття наноструктур особливу наукову та практичну зацікавленість становлять

наночастинок благородних металів, зокрема золота [4–8]. Останні характеризуються вираженим поверхнево-плазмонним резонансом, що становить основу їх унікальних оптичних і сенсорних характеристик. Особливу увагу привертає використання наночастинок золота як колориметричних складових/сенсорів, принцип дії яких ґрунтується на зміні спектральних характеристик поверхнево-плазмонного резонансу внаслідок агрегації або поверхневої взаємодії з аналітами.

Проте ефективність їх використання залежить від фізико-хімічних характеристик: розміру, форми, стабільності та функціоналізації поверхні, що, як відомо, обумовлено підходом (методом) та параметрами синтезу [10–12]. Відтак не достатньо вивченими на сьогодні залишаються залежності «розмір НЧ-стабілізатор-аналіт», що обмежує





Рис. 1. Застосування золотих наночастинок як біосенсорів

сферу їх використання, як колориметричних сенсорів поллютантів харчових продуктів та питної води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день перелік поллютантів харчових продуктів та питної води широкий. До пріоритетних забруднювачів води та харчових продуктів належать хімічних контамінантів біологічного походження, іони важких металів та пестициди [9-13]. На сьогодні відомо значну кількість публікацій [5-20] із даними щодо використання наносистем Au НЧ для їх детекції в харчових продуктах та водних ресурсах. Зазначається, що колориметричний аналіз наночастинок золота базується на зміні поверхневого плазмонного резонансу, спричиненого агрегацією Au НЧ та зміною морфології поверхні або міжчастинкової відстані. Наразі вважається, що механізм сенсорного сприйняття залежить від агрегації наночастинок та зміни ступеня дисперсії, викликаного аналітом, що змінює міжчастинковий плазмонний зв'язок, виявлений за допомогою спектральних ліній ППР. Як правило, в дослідженнях використовуються різні, не спеціально підібрані та синтезовані наносистем золота з різними розмірними характеристиками (середній розмір НЧ, полідисперсність) в широкому діапазоні 5-60 нм та з різними типами стабілізаторів/функціоналізаторів наночастинок (Таблиця 1). При цьому, в більшості праць [8-20] не визначається вплив саме варіювання розміру наночастинок та підбір стабілізатора/функціоналізатора на колориметричну ефективність до різних типів аналітів.

Сенсори на основі Au НЧ продемонстрували ефективність у виявленні мікробного забруднення, а саме у виявленні шкідливих бактерій, присутніх у джерелах води. Наприклад, попередні дослідження показали ідентифікацію *Escherichia coli* (*E. coli*) у зразках води за допомогою сенсорів на основі наночастинок золота (Au НЧ), що досягло порогів виявлення до 1 КУО/мл. Аналогічно, наночастинки золота (Au НЧ) були використані для виявлення кількох захворювань, включаючи сальмонелу. Біосенсори на основі золотих наночастинок (Au НЧ) використовувалися в моніторингу якості води для точного виявлення важких металів. Загалом, повідомляється про селективне виявлення іонів важких металів із використанням наносистем Au НЧ, зокрема Hg^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} та Zn^{2+} , As^{3+} , Cd^{2+} і Cr^{3+} [7-20], а також низки біологічно активних молекул, хімічних контамінантів біологічного походження. Відтак до останньої категорії належить гістамін – біогенний амін, який часто асоціюється з алергічними реакціями та є значною причиною харчових отруєнь, що виникають внаслідок вживання зіпсованих продуктів. Європейська комісія визнала потенційний ризик гістаміну для здоров'я людини та встановила максимальні рівні в харчових продуктах, а також встановила жорсткі вимоги щодо селективного та чутливого визначення гістаміну.

Постановка завдання. Мета роботи – одержання та стабілізація/функціоналізація поверхні наночастинок золота із впливом на їх розмірні характеристики для забезпечення ефективної

взаємодії з сполуками-забрудниками-аналітами харчових продуктів та питної води при колориметричному визначенні.

Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень

Наночастинки золота було синтезовано із використанням сучасних підходів: «зеленого» плазмохімічного способу із різними стабілізаторами [18-19] та синтезу із застосуванням екстракту, одержаного низькотемпературним евтектичним розчинником [21, 22]. В якості стабілізатора-функціоналізатора утворюваних наночастинок використовували представників різних типів стабілізаторів – цитрат натрію, карбоксиметил целюлозу та полівініловий спирт (табл. 2).

Оптичні спектри колоїдних розчинів реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-5800PC (поглинання в діапазоні $\lambda=190-700$ нм) з використанням кварцових кювет. Величину дзета-потенціалу колоїдних систем визначали методом електрофоретичного руху частинок на приладі Zetasizer Nano-25 (Malvern Instruments Ltd., Малверн, Великобританія) для оцінки стабільності наночастинок у розчині.

Як сполуки-забрудники-аналіти харчових продуктів та питної води були використано гістамін та іони хрому.

Розчини аналіту готували шляхом розчинення певної кількості гістаміну в воді з у досліджуваній концентрації. Аліквоту розчину аналіту об'ємом 50 мкл додавали до 2,0 мл Au НЧ та давали прореагувати від 30 с до 1 хвилини для колориметричного тестування. Досліджуваний розчин характеризували за допомогою УФ-видимого випромінювання для отримання спектрів поглинання та оцінки змін піку поверхневого плазмонного резонансу (ППР) Au НЧ після додавання аналітів.

Отримані експериментальні результати

На рис. 2 наведено спектри одержаних колоїдних розчинів НЧ Au при використанні різних підходах синтезу: плазмохімічний синтез із традиційними стабілізаторами (а-б) та «зелений» синтез із використанням екстракту НЕР із жому

шкірки банану (г). Як відомо, плазмонний резонанс НЧ Au з діаметром $\sim d=20-80$ нм локалізований в УФ-частині видимого спектру (близько $\sim \lambda=520-600$ нм), що пояснює червоний/рожевий/фіолетовий колір таких золів. Видно, що одержані наносистеми золота проявляють виражений максимум ЛППР в характерному нанозолоту діапазоні $\lambda_{\text{макс}}=520-580$ нм, що характерні НЧ золота з розміром НЧ 30-60 нм.

В значній кількості робіт [1-5] наразі вже встановлено закономірність діаметру НЧ золота від довжини хвилі піку ЛППР. Прийнято вважати, що піки при ППР $\lambda=500-510$ нм відповідають діаметру частинок до 3-10 нм; $\lambda=520-560$ нм ($d=15-40$ нм), 570-600 нм ($d=60-80\pm 100$ нм). Аналіз одержаних спектральних даних свідчить, що вже через 0,83~1-3 хв. обробки розрядом плазми виражено фіксуються піки ЛППР в діапазоні $\lambda=500-600$ нм ($A=0,2$ від.од.), що характерні НЧЗ з середнім розміром $\sim 10-80$ нм. Аналіз зображення – СЕМ типового одержаного зразка узгоджується з отриманими спектральними даними і на зображенні фіксуються фази агрегатів дрібних НЧ та окремо НЧ розміром.

При використанні екстракту шкірки банану НЕР синтез наночастинок Au відбувається повільніше ніж при плазмохімічному і виражений пік лінії ППР при $\lambda=530$ нм ($A=0,3$ від. од.) спостерігається через 35 хв. (рис. 1 г). Узагальнені данні впливу типу стабілізатора/функціоналізатора та способу синтезу на характеристики одержаних наночастинок золота представлено на рис. 3.

Здійснено дослідження використання наночастинок для колориметричного виявлення різних типів поллютантів: гістамін та важкі метали. У Європейського союзу рівень гістаміну в рибі не повинен перевищувати 100-200 мг/кг залежно від виду та методу обробки, тоді як Управління з контролю за якістю харчових продуктів і медикаментів США встановлює рівень дії для виявлення дефектів на рівні 50 мг/л. Визначення гістаміну було проведено для підтвердження можливості використання синтезованого сенсора Au НЧ для

Таблиця 2

Склад систем НЧ, що використовували для колориметричного визначення поллютантів

Тип стабілізатора/функціоналізатора	Співвідношення компонентів	Умови синтезу
Цитрат натрію	Au^{3+} (0,3 ммоль/л) $[Au^{3+}]/[Цит]=[1]:[10]$	Плазмохімічний синтез
Карбоксиметил целюлоза	Au^{3+} 0,3 ммоль/л $[Au^{3+}]/[КМЦ]=[1]:[4,5]$	
Полівініловий спирт	Au^{3+} 0,45 ммоль/л $[Au^{3+}]/[ПВС]=[1]:[18]$	
Низькотемпературний евтектичний розчинник-екстракт	Au^{3+} (0,3 ммоль/л), розчин прекурсора з екстрактом НЕР у співвідношенні 1:10 об./об., а потім нагрівання реакційної суміші до 85-90°C	Хімічний синтез

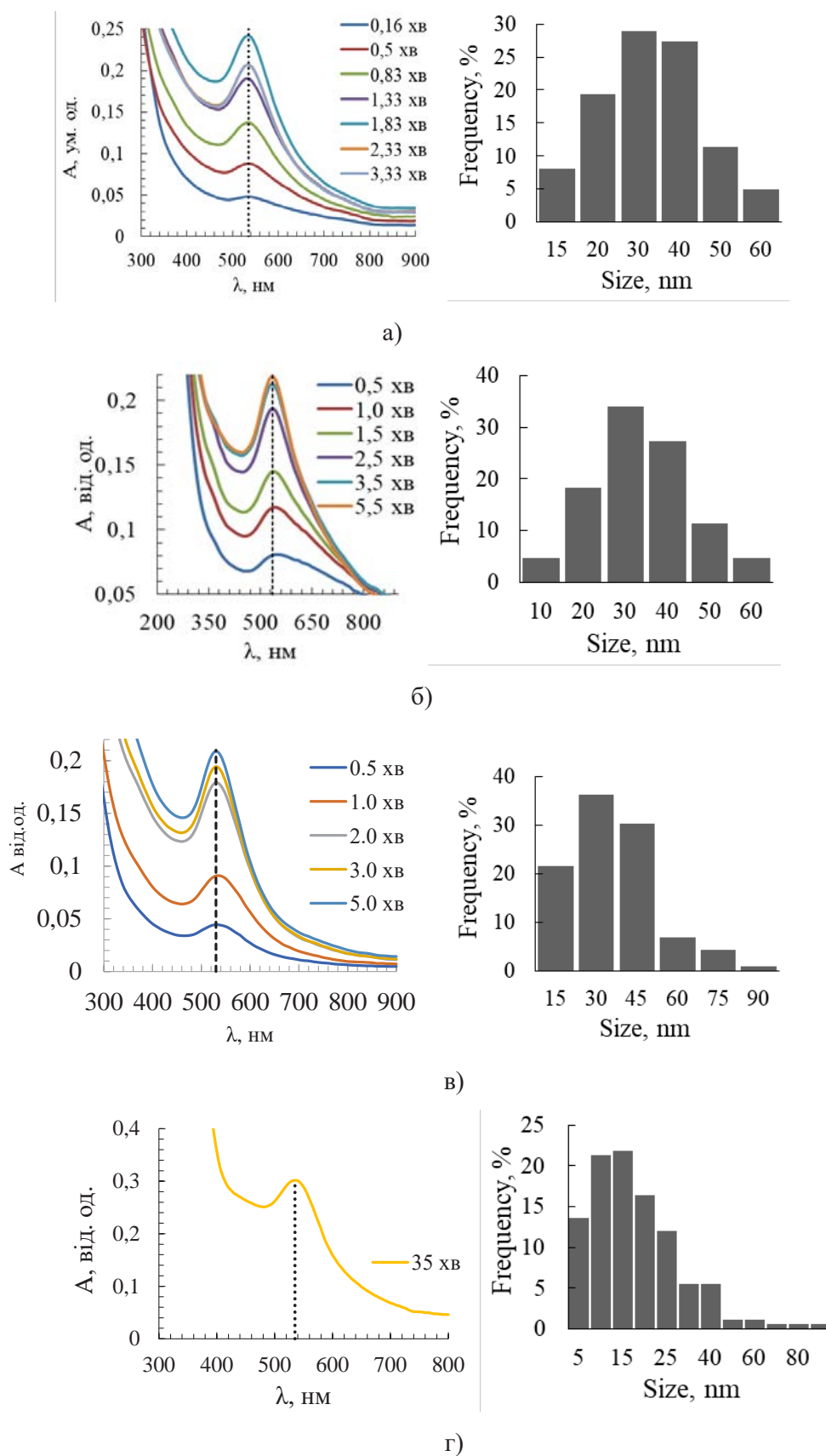


Рис. 2. Спектри Au НЧ при Au^{3+} (0,3 ммоль/л) залежно від тривалості синтезу та відповідне розподілення за розміром НЧ (за результатом СЕМ) з різними стабілізаторами при плазмохімічному синтезі: цитрат натрію (а), карбоксиметилцелюлоза (б), полівініловий спирт (в) та синтезі із використанням екстракту НЕР (г)

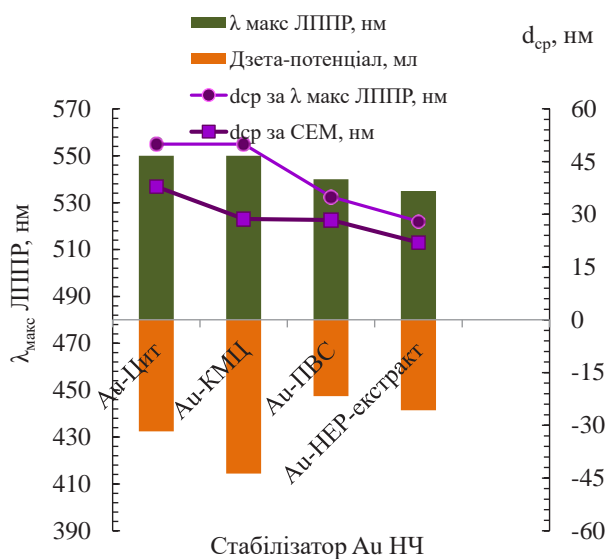


Рис. 3. Вплив типу стабілізатора/функціоналізатора та способу синтезу на характеристики одержаних наночастинок золота

швидкого колориметричного виявлення. Спостерігалися зміни спектрів поглинання та зміни кольору розчину, викликані взаємодією між гістаміном та Au НЧ. За спектрами поглинання можна спостерігати, що пік ППП поступово зміщується в бік більшої довжини хвилі зі збільшенням концентрації гістаміну, що пов'язано з індукованою гістаміном агрегацією Au НЧ. Для кожного зразка побудовано калібрувальні залежності A_{700}/A_{520} від концентрації гістаміну у діапазоні 1–40 мг/л. На основі нахилу регресії та стандартного відхилення залишків сигналу розраховано LOD і LOQ. Для зразка Au-Цитрат $\text{LOD} \approx 23,2$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 70,3$ мг/л; для зразка Au-КМЦ: $\text{LOD} \approx 19,8$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 60,1$ мг/л; для зразка Au-ПВС: $\text{LOD} \approx 29,9$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 90,7$ мг/л; для зразка Au-HER : $\text{LOD} \approx 24,4$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 77,1$ мг/л;

Для дослідження реакції колориметричного сенсора на Cr(VI) з визначенням LOD та LOQ, були досліджені УФ-спектри поглинання Au НЧ та різних концентрацій Cr(VI) за оптимальних експериментальних умов [27]. Було виявлено, що значення поглинання при 690 нм також постійно зростає зі зростанням концентрації Cr(VI), що пояснюється збільшенням кількості агрегованих AuNPs зі збільшенням вмісту Cr(VI), а отже, і збільшенням поглинання. Після додавання Cr(VI) з'являється новий пік при 690 нм, що свідчить про агрегацію наночастинок. Зв'язок між співвідношенням поглинання при $A_{600}/$

A_{530} та Cr(VI) був використаний для створення лінійної кореляції. Дані показують лінійну кореляцію ($R^2 = 0,997$) між коефіцієнтом поглинання та концентрацією Cr(VI) у діапазоні 0,1–3,0 мкМ. Методи демонструють добру лінійність у діапазоні від 0,1 до 3,0 мкМ без значного впливу перешкод. Загальна ефективність зразків за чутливістю та точністю визначення хрому зменшується: Au-цитрат з $\text{LOD} \approx 0,0056$ мг/л та $\text{LOQ} \approx 0,0188$ мг/л → Au-КМЦ ($\text{LOD} \approx 0,0252$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 0,0839$ мг/л) → Au-ПВС ($\text{LOD} \approx 0,0407$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 0,1357$ мг/л) → Au-HER, який характеризується найвищими значеннями $\text{LOD} \approx 0,0440$ мг/л та $\text{LOQ} \approx 0,1468$ мг/л.

Висновки. Проведено дослідження синтезу та стабілізації/функціоналізації поверхні золотих наночастинок (Au НЧ) із контролем середнього розміру, розподілу за розміром та ζ -потенціалу для ефективної взаємодії з поліютантами та аналітами харчових продуктів і питної води. Використано сучасні методи плазмохімічного синтезу з різними стабілізаторами/функціоналізаторами, включно з цитратом натрію, карбоксиметилцелюлозою, полівініловим спиртом та рослинними екстрактами (жом винограду, банану) у низькотемпературних евтектичних розчинниках (холін хлорид-гліцерол). Модельними поліютантами для колориметричного визначення були гістамін та іони хрому. При взаємодії Au НЧ з поліютантами спостерігався червоний зсув та зменшення інтенсивності піку поверхневого плазмонного резонансу ($\lambda \approx 530$ нм) разом із появою нового піку ($\lambda \approx 650$ – 700 нм), що підтверджує агрегаційний механізм колориметричного виявлення. Тип стабілізатора/функціоналізатора визначає колориметричну чутливість наночастинок навіть при близьких розмірах НЧ. Межі виявлення (LOD) та кількісного визначення (LOQ) гістаміну залежать від стабілізатора і складають 19,8–29,9 мг/л та 60,1–90,7 мг/л відповідно. Вибір стабілізатора наночастинок безпосередньо впливає на ефективність та чутливість колориметричної сенсорної системи, що є критичним для розробки високоефективних сенсорів для харчових продуктів та води.

Фінансування

2025.07/0078 «Створення та модифікація низькотемпературних евтектичних розчинників нового покоління як рідкофазних функціональних матеріалів: застосування для виявлення та контролю поліютантів широкого спектру» за конкурсом «Передова наука в Україні 2026-2028»

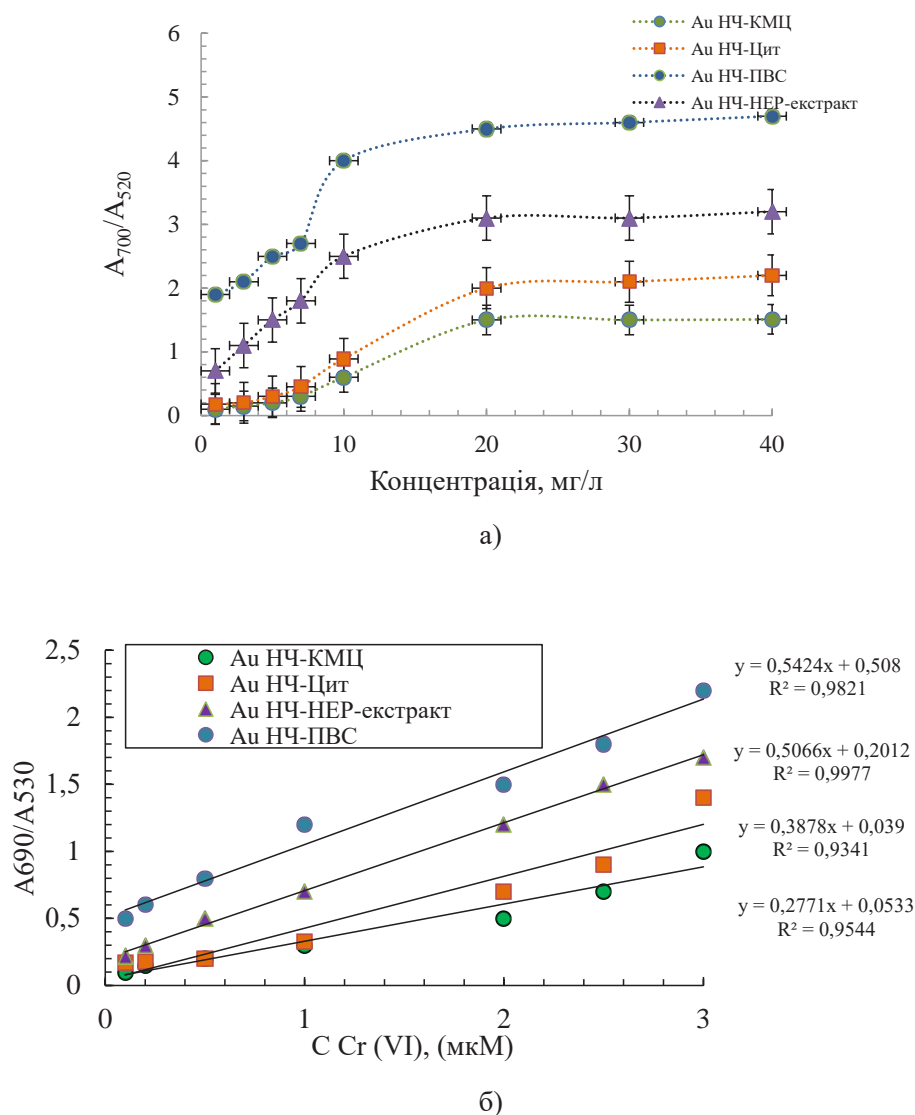


Рис. 4. Лінійна залежність між значенням поглинання (A_{700}/A_{520}) та концентрацією поллютанта: в діапазоні 0,02–40 мг/л для гістаміну (а) та іонів хрому 0,0052–0,156 мг/л (б))

Список літератури:

- Baig N., Kammakam I., Falathabe W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Mater. Adv.* 2021. Vol. 2 (6). P. 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
- Joudeh N., Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *J. Nanobiotechnol.*, 2022, 20, 262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
- Lee Y., Haizan I., Sim S.B., Choi J.-H. Colorimetric Biosensors: Advancements in Nanomaterials and Cutting-Edge Detection Strategies. *Biosensors* 2025. Vol. 15 (6). P. 362. <https://doi.org/10.3390/bios15060362>
- Cui Y., Zhao J., Li H. Chromogenic Mechanisms of Colorimetric Sensors Based on Gold Nanoparticles. *Biosensors* 2023. Vol. 13 (8). P. 801. <https://doi.org/10.3390/bios13080801>
- Putri L.A., Prabowo Y.D., Maulina Dewi D.M., Mumtazah Z., Adila F.P., Fadillah G., Amrillah T., Triyana K., Nugroho F.A.A., Wasisto H.S. Review of Noble Metal Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors for Food Safety Monitoring. *ACS Appl. Nano Mater.* 2024. Vol. 7 (17). P. 19821–19853. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c04327>
- Nadumane S.S., Biswas R., Mazumder N. Eco-friendly colorimetric detection of lead and mercury using l-cysteine-functionalized gold nanoparticles: a step towards greening the exposome. *RSC Adv.* 2025. Vol. 15 (15). P. 11573–11579. <https://doi.org/10.1039/D5RA01445J>
- Duan X., Li X., Yang Q. A colorimetric sensor of functionalized gold nanoparticles for the identification of copper and magnesium ions based on SPR and Gaussian calculations. *Microchem. J.* 2025. Vol. 210. P. 112980. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112980>

8. Cho H.H., Jung D.H., Heo J.H., Lee C.Y., Jeong S.Y., Lee J.H. Gold Nanoparticles as Exquisite Colorimetric Transducers for Water Pollutant Detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023. Vol. 15 (16). P. 19785–19806. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c00627>
9. Guleria A., Sachdeva H., Saini K., Gupta K., Mathur J. Recent trends and advancements in synthesis and applications of plant-based green metal nanoparticles: A critical review. *Appl. Organomet. Chem.* 2022. Vol. 36 (6). P. e6778. <https://doi.org/10.1002/aoc.6778>
10. Sati A., Ranade T.N., Mali S.N., Ahmad Yasin H.K., Pratap A. Silver Nanoparticles (AgNPs): Comprehensive Insights into Bio/Synthesis, Key Influencing Factors, Multifaceted Applications, and Toxicity—A 2024 Update. *ACS Omega* 2025. Vol. 10 (8). P. 7549–7582. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11045>
11. Liu G., Lu M., Huang X., Li T., Xu D. Application of Gold-Nanoparticle Colorimetric Sensing to Rapid Food Safety Screening. *Sensors (Basel)* 2018. Vol. 18 (12). P. 4166. <https://doi.org/10.3390/s18124166>
12. Gebremedhin K.H., Kahsay M.H., Wegahita N.K., et al. Nanomaterial-based optical colorimetric sensors for rapid monitoring of inorganic arsenic species: a review. *Discover Nano* 2024. Vol. 19. P. 38. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-03981-2>
13. Priyadarshini E., Pradhan N. Gold nanoparticles as efficient sensors in colorimetric detection of toxic metal ions: A review. *Sensors Actuators B Chem.* 2017. Vol. 238. P. 888–902. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.081>
14. Cho H.H., Heo J.H., Jung D.H., et al. Portable Au Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor Strip for Rapid On-Site Detection of Cd²⁺ Ions in Potable Water. *BioChip J* 2021. Vol. 15. P. 276–286. <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00029-w>
15. Fahimi-Kashani N., Hormozi-Nezhad M.R. Gold-Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor Array for Discrimination of Organophosphate Pesticides. *Anal. Chem.* 2016. Vol. 88 (16). P. 8099–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01616>
16. Alberti G., Zanoni C., Magnaghi L.R., Biesuz R. Gold and Silver Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: New Trends and Applications. *Chemosensors* 2021. Vol. 9 (11). P. 305. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9110305>
17. Zhang X., Kanaras A.G., Yin Y. Colorimetric Plasmonic Nanosensors for Environmental Pollution Monitoring. *Materials and Interfaces* 2025. Vol. 2 (3). P. 261–284. <https://doi.org/10.53941/mi.2025.100021>
18. Skiba M., Vorobyova V. Sustainable PVP-capped gold nanoparticles synthesis “green” chemistry plasma-liquid method and colorimetric activity for water pollutant chromium ion (Cr(VI)). *Gold Bull* 2025. Vol. 58. P. 15. <https://doi.org/10.1007/s13404-025-00368-8>
19. Skiba M., Velichko H., Skyba Y., Vorobyova V. Sustainable caffeine-capped gold nanoparticles synthesis «green» chemistry by plasma-liquid method: practical application - colorimetric visualization and antioxidant activity. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2026. Vol. 473. P. 116893. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116893>
20. Sultana E., Al Mamun M.S. Golden eyes on pollutants: colorimetric detection of emerging contaminants with AuNPs. *RSC Adv.* 2025. Vol. 15 (39). P. 32833–32870. <https://doi.org/10.1039/D5RA01445J>
21. Vorobyova, V., Skiba, M., Vinnichuk, K. et al. Synthesis of gold nanoparticles using deep eutectic solvents and their incorporation into polyvinyl alcohol-based eutectogels: structural, chemical, and functional analysis. *Colloid Polym Sci* 303, 1213–1234 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00396-025-05403-w>
22. Skiba M.Yu., Skyba Y.M., Kovalenko I.L., Gnatko O.M., Radkevych T.O., Vorobyova V.I. Green Approach to the Synthesis of Gold Nanoparticles with Antimicrobial Activity Using Plant Extracts Based on a Deep Eutectic Solvent. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2025, No. 6, 63–71. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Skyba M.I. SYNTHESIS AND FUNCTIONALIZATION OF GOLD NANOPARTICLES FOR POLLUTANT DETECTION

The study investigated the synthesis, stabilization, and functionalization of gold nanoparticles (Au NPs) with respect to their characteristics (average particle size, size distribution, and zeta potential) to ensure effective interaction with pollutant-analyte compounds in food products and drinking water during colorimetric detection. Modern synthesis methods were employed to vary the nanoparticle characteristics, including plasma-chemical synthesis with different types of stabilizers/functionalizers (sodium citrate, carboxymethyl cellulose, polyvinyl alcohol, grape pomace extract, and banana pomace extract) obtained using a “green” low-temperature eutectic solvent (choline chloride–glycerol).

It was demonstrated that the obtained Au NPs exhibit a surface plasmon resonance (SPR) peak at $\lambda = 520\text{--}530\text{ nm}$, an average particle size (d_{avg}) of 20–55 nm, a size distribution up to 100 nm, and zeta potentials (ζ) ranging from -21.7 to 43.5 mV , depending on the type of stabilizer and synthesis method. Histamine and chromium ions were used as model pollutant-analyte compounds in food products and drinking water.

During colorimetric detection of pollutants, the UV–visible spectra of all synthesized Au NPs showed a red shift and a decrease in the SPR peak intensity at $\lambda = 530\text{ nm}$, along with the appearance of a new peak at $\lambda = 650\text{--}700\text{ nm}$, indicating an aggregation-based mechanism of Au NP detection. It was found that the type of stabilizer plays a decisive role and affects the colorimetric sensitivity at similar nanoparticle sizes.

The limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) for histamine detection were 23.2–29.9 mg/L and 60.1–90.7 mg/L, respectively, and 19.8–29.9 mg/L and 60.1–90.7 mg/L, depending on the type of stabilizer/functionalizer. It was established that the choice of nanoparticle stabilizer directly influences the sensitivity of the colorimetric sensor system.

Keywords: nanoparticles, modification, plasma discharge, low-temperature eutectic solvent, extract, sensor, colorimetric analysis, optical analysis methods, pollutants, aquatic environment.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026