



УДК 544.77+548.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.15>

## ОДЕРЖАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ВАНІЛІНУ

**В. А. Литвин<sup>1</sup>, Р. А. Галаган<sup>2</sup>, Е. О. Романенко<sup>3</sup>,  
Ю. А. Шафорост<sup>4</sup>, О. А. Лут<sup>5</sup>**

*Наночастинки золота є цікавим об'єктом нанотехнологій завдяки перспективам їхнього застосування у промисловості та медицині. Досліджено особливості перебігу процесу одержання наночастинок золота у реакції відновлення  $\text{HAuCl}_4$  природним ароматичним альдегідом ваніліном.*

*У даному процесі ванілін виконує функцію відновника  $\text{Au}^{3+}$  іонів та стабілізатора утворених наночастинок золота. Запропоновано метод очистки і концентрування золотого гідрозолу методом іонного обміну. Проведено комплексне дослідження властивостей одержаних наночастинок золота. Спектрофотометричні дослідження показали наявність у спектрі поглинання максимуму при 530 нм, який зумовлений явищем поверхневого плазмонного резонансу. Методом рентгенівської дифракції встановлено, що одержані наночастинки мають ГЦК ґратку з середнім діаметром кристалітів 35 нм. Методом просвічуючої електронної мікроскопії показано, що одержані наночастинки мають сферичну форму з розміром в діапазоні від 10 до 45 нм. Методом циклічної вольтамперометрії досліджено електрохімічну поведінку одержаних наночастинок золота. Встановлено стехіометрію сумарного процесу в системі, яка містить ванілін, гідроген тетрахлоороаурат та натрій гідроксид, яка становить 3:4:16. Запропоновано гіпотетичну модель процесу формування первинних кластерів золота ( $\text{Au}_4$ ), яка задовольняє експериментальні дані.*

<sup>1</sup> кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)  
e-mail: litvin\_valentina@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-1236-6344

<sup>2</sup> старший викладач кафедри хімії та наноматеріалознавства (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)  
e-mail: garol@ukr.net  
ORCID: 0009-0007-7115-0486

<sup>3</sup> магістрантка кафедри хімії та наноматеріалознавства (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)  
e-mail: eli.rom2020@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-6108-4338

<sup>4</sup> кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)  
e-mail: zdoryulia@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-0002-2803

<sup>5</sup> кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)  
e-mail: lutlen@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-0288-4255

Отримані результати свідчать про перспективність подальших досліджень наночастинок золота, одержаних з використанням ваніліну, у зв'язку з можливістю їх використання у різних галузях науки та техніки.

**Ключові слова:** наночастинки, золото, ванілін, стехіометрія, механізм.

## PREPARATION OF GOLD NANOPARTICLES USING VANILLIN

V. A. Litvin, R. L. Galagan, E. O. Romanenko, Yu. A. Shaforost, O. A. Lut

Gold nanoparticles are an interesting object of nanotechnology due to prospects of their application in industry and medicine. The peculiarities of the process of obtaining gold nanoparticles in the reaction of reduction of  $\text{HAuCl}_4$  with the natural aromatic aldehyde vanillin were studied. In this process, vanillin acts as a reducer of  $\text{Au}^{3+}$  ions and a stabilizer of formed gold nanoparticles. A method of purification and concentration of gold hydrosol by the ion exchange method is proposed. A comprehensive study of the properties of the obtained gold nanoparticles was carried out. Spectrophotometric studies showed the presence of a maximum at 530 nm in the absorption spectrum, which is caused by the phenomenon of surface plasmon resonance. Using the X-ray diffraction method, it was established that the obtained nanoparticles have an fcc lattice with an average crystallite diameter of 35 nm. The method of transmission electron microscopy showed that the obtained nanoparticles have a spherical shape with a size in the range from 10 to 45 nm. The electrochemical behavior of the obtained gold nanoparticles was investigated by the method of cyclic voltammetry. The stoichiometry of the total process in the system containing vanillin, hydrogen tetrachloroaurate and sodium hydroxide was established, which is 3:4:16. A hypothetical model of the process of formation of primary clusters of gold ( $\text{Au}_4$ ) is proposed, which satisfies the experimental data. The obtained results indicate the perspective of further research of gold nanoparticles obtained using vanillin, in connection with the possibility of their use in various fields of science and technology.

**Key words:** nanoparticles, gold, vanillin, stoichiometry, mechanism.

### Вступ

Актуальність різностороннього вивчення золота у нанодисперсному стані обумовлена рідкісним поєднанням цінних якостей: унікальні оптичні властивості, обумовлені плазмонним поглинанням, розвинена поверхня, потужна каталітична дія, висока ємність подвійного електричного шару та інші (Bai et al., 2020). Завдяки цьому наночастинки золота можуть слугувати матеріалом для створення електронних, оптичних, сенсорних пристроїв нового покоління, у медицині вони знаходять застосування у діагностиці та лікуванні онкологічних захворювань і т.п. (Bai et al., 2020; Hu et al., 2020; Hammami et al., 2021).

Існує багато способів переведення компактного золота у нанодисперсний стан. Найбільш відомими є електроерозійний спосіб, конденсація пари металу на охолодженій основі, спільна конденсація пари металу та полімеру, радіаційне відновлення йонів  $\text{Au}^{3+}$  у присутності речовин-стабілізаторів, хімічне відновлення розчинних солей  $\text{Au}^{3+}$  тощо (Alle et al., 2020; Hu et al., 2020; Alabdallah et al., 2021). Однак методи хімічного відновлення набули найбільшого поширення завдяки простоті синтезу та можливості контролювати розміри

та форму наночастинок шляхом зміни умов синтезу.

Найбільш широко дослідженим синтезом наночастинок золота є цитратний метод (Oliveira et al., 2023), який був представлений Фарадеєм у 1857 році та згодом удосконалений Френсом (Frens et al., 1973), а також метод 2-фазної екстракції з борогідридним відновленням, описаний Вілкоксоном та ін. (Wilcoxon et al., 1993) і вдосконалено Brust et al. (Brust et al., 1994). На сьогодні одержання нанозолота у вигляді нанострижнів, нанониток та наносфер хімічним відновленням іонів тетрахлораурату у науковій періодиці присвячено дуже велику кількість робіт (Edwards et al., 2007; Litvin et al., 2014; Amina et al., 2020; Yenda et al., 2022; Oliveira et al., 2023). У ролі відновників та стабілізаторів використовують різноманітні органічні та неорганічні речовини.

В останнє десятиліття особливої популярності набули «зелені методи» синтезу, які передбачають використання природних біологічних систем в ролі відновників, зокрема рослинних екстрактів, бактерій, грибів, водоростей (Husen et al., 2017; Abdelghany et al., 2019; Santhosh, 2022). Зелений синтез наночастинок срібла має переваги перед фізичними, хімічними та мікробіологічними

процедурами синтезу, оскільки він є дешевим, екологічно чистим, зручним одноетапним методом, який легко масштабується та не потребує використання високого тиску, енергії, температури і отрутохімікатів для виробництва.

Дуже часто поза увагою дослідників залишається характер трансформації складних органічних відновників у ході окисно-відновного процесу. Обов'язковою ланкою цього процесу має бути утворення атомних кластерів металу, які є безпосередніми будівельними елементами для наночастинок. Як правило, постулюється двохелектронне окиснення органічних молекул. При цьому загальна стехіометрія також часто залишається поза увагою.

Ароматичний альдегід ванілін (3-метокси-4-гідроксибензальдегід) є відносно мало дослідженим відновником, який було використано у синтезі наночастинок золота. Використання ваніліну в ролі відновника у процесі одержання наночастинок золота описано лише в одній науковій статті, доступній у Web-пошуку (Argu et al., 2019). Цей синтез, без сумніву, можна вважати «зеленим», адже ванілін є продуктом природного походження. Речовину добувають з плодів тропічної ліани *Vanilla planifolia* та широко використовують у харчовій і парфумерній промисловості. Автори публікації не ставили собі за мету дослідити механізм цього процесу. Хімізм процесу утворення первинних кластерів з атомів золота, які є попередниками золотих наночастинок залишається дотепер невідомим. Тому метою роботи було встановлення експериментальним шляхом сумарної стехіометрії процесу і розробка гіпотетичного механізму формування атомних металокластерів, як попередників наночастинок металічного золота.

### Матеріали і методи

При проведенні досліджень були використані наступні реактиви: 0,1 М розчин NaOH (х.ч.), 0,05 М розчин  $\text{HAuCl}_4$  (х.ч.), 0,05 М розчин ваніліну (х.ч), дистильована вода.

Для встановлення стехіометрії процесу було проведено ряд синтезів з різними варіантами молярного співвідношення реагентів для пошуку максимуму оптичної густини в діапазоні  $\lambda = 520\text{--}530$  нм (табл. 1).

В типовому експерименті в стакан на 150 мл наливали воду, в такому об'ємі, щоб з урахуванням об'ємів розчинів реактивів, що додаються, загальний об'єм розчину склав 50,0  $\text{cm}^3$ . Спочатку додавали розчини ваніліну і луку, а потім, при перемішуванні, розчин  $\text{H[AuCl}_4]$ . Стакан з реакційною сумішшю ставили у водяну баню за температури 80–90 °С і витримували протягом 20 хв. Далі вимірювали рН реакційної суміші та її оптичну густину при довжинах хвиль 450, 530 та 700 нм.

Спектри поглинання розчинів, що містять наночастинок золота знімали на спектрофотометрі СФ-26. Зразок готували шляхом відбору 1,5 мл одержаного гідрозолу золота і розбавлення дистильованою водою в мірній колбі на 25 мл. Розчином порівняння слугувала дистильована вода. Спектри поглинання знімали в діапазоні 320–600 нм в кюветах товщиною 1 см.

Рентгенівські дифрактограми знімали на дифрактометрі ДРОН-2. Для приготування зразку одержаний золь золота осаджували  $\text{Cu}^{2+}$  йонами, осад центрифугували і промивали дистильованою водою, після цього його висушували в сушильній шафі при температурі 60 °С. Отриманий порошок змішували з водною емульсією клею ПВА і наносили на спеціальну пластинку, яку потім поміщали у дифрактометр.

Таблиця 1

Варіанти молярних співвідношень реагентів синтезів

№ досл.	$V(\text{Van})$	$V(\text{NaOH})$	$V(\text{HAuCl}_4)$	$\text{pH}_{\text{кін.}}$	$D_{450}$	$D_{530}$	$D_{700}$	$V(\text{H}_2\text{O})$
1	1,00	0,3	1,0	3,32	0,510	0,110	0,021	45,00
2	0,70	0,3	1,0	3,25	0,527	0,120	0,015	45,30
3	0,50	0,3	1,0	3,45	0,065	0,128	0,017	45,50
4	0,70	0,4	1,0	4,50	0,070	0,140	0,022	44,30
5	0,70	0,2	1,0	3,15	0,075	0,145	0,016	46,30
6	<b>0,75</b>	<b>0,2</b>	<b>1,0</b>	<b>3,05</b>	<b>0,079</b>	<b>0,147</b>	<b>0,009</b>	<b>46,25</b>
7	0,75	0,2	1,2	3,07	0,083	0,135	0,010	46,10
8	0,70	0,2	0,8	3,21	0,078	0,130	0,015	46,50
9	0,70	0,25	1,4	3,52	0,070	0,123	0,018	45,40

Геометричні параметри наночастинок золота вивчали на електронному мікроскопі JEM-200A фірми "JEOL" (Японія). Розподіл наночастинок за розмірами проводили на основі отриманих електронних зображень шляхом вимірювання не менше ніж 100 частинок.

### Результати та обговорення

Змішування ваніліну з гідроген тетрахло-рауратом у лужному середовищі приводить до утворення стійкого гідрозолу, що містить наночастинки золота. Під час реакції ванілін відновлює іони  $\text{Au}^{3+}$  іони та інкапсулює наночастинки золота, щоб запобігти агломерації та створити бар'єр для росту частинок. Одержані гідрозолі у прохідному світлі мали глибокий пурпуровий колір та ледь помітну опалесценцію у відбитому світлі. Для дуже розведеного гідрозолу спостерігали явище Тіндаля, внаслідок розсіяння світла на наночастинках при пропусканні променя крізь гідрозоль (рис. 1). Таке явище може слугувати надійним індикатором наявності в середовищі частинок, співмірних з довжинами хвиль видимого електромагнітного випромінювання (300–700 нм). Як відомо, молекулярно-дисперсними системами це випромінювання не розсіюється.

Спектрофотометричне дослідження одержаного розчину показало наявність в спектрі поглинання смуги з максимумом при 530 нм, що є характерним для наночастинок золота і пояснюється явищем поверхневого плазмонного резонансу (див. рис. 1). Оскільки спектр поглинання одержаних наночастинок золота містить лише один максимум, то можна зробити висновок про сферичну форму одержаних наночастинок.

Проведення серії препаративних синтезів гідрозолів золота з ваніліном при

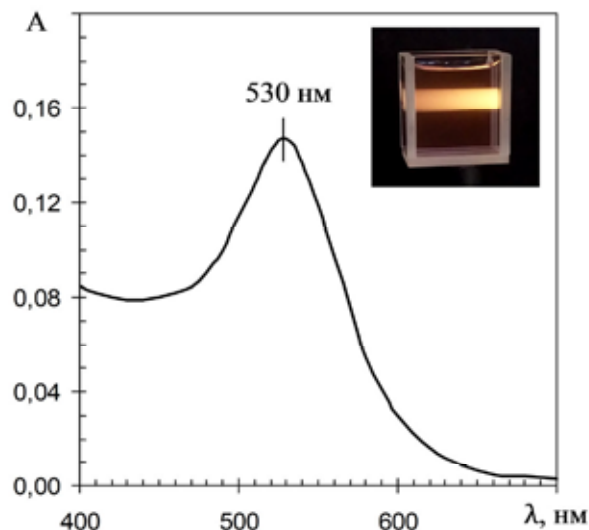
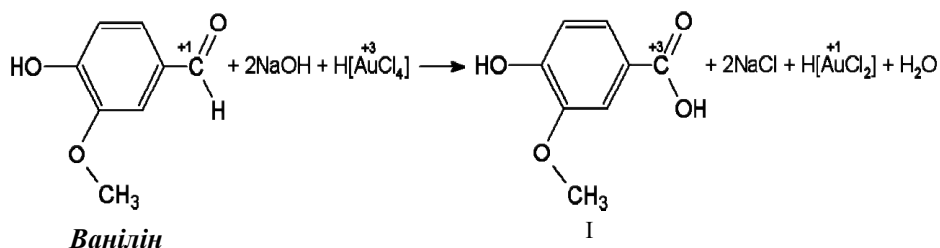


Рис. 1. Спектр поглинання гідрозолу золота та явище Тіндаля у гідрозолі золота

зміні молярного співвідношення реагентів  $n_{\text{Van}} : n_{\text{Au}} : n_{\text{OH}}$ , для пошуку максимуму оптичного поглинання при довжині хвилі 520–530 нм дозволило експериментально встановити стехіометрію процесу. З табл. 1 видно, що стехіометрія сумарного процесу в системі, яка містить ванілін у ролі відновника та попередника стабілізуючих молекул, натрій гідроксид та гідроген тетрахло-рауратну кислоту може бути виражена таким молярним відношенням реагентів:  $n(\text{Van}) : n(\text{HAuCl}_4) : n(\text{NaOH}) = 3 : 4 : 16$ .

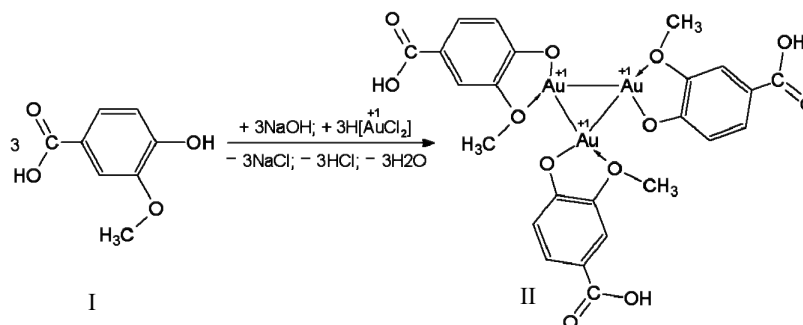
Відповідно до цього співвідношення нами запропоновано гіпотетичну модель процесу яка задовольняє експериментальні дані.

Першою стадією процесу може бути окиснення ваніліну тетрахлоауратною кислотою до 3-метокси-4-гідроксибензенової (ванілінової) кислоти (I).



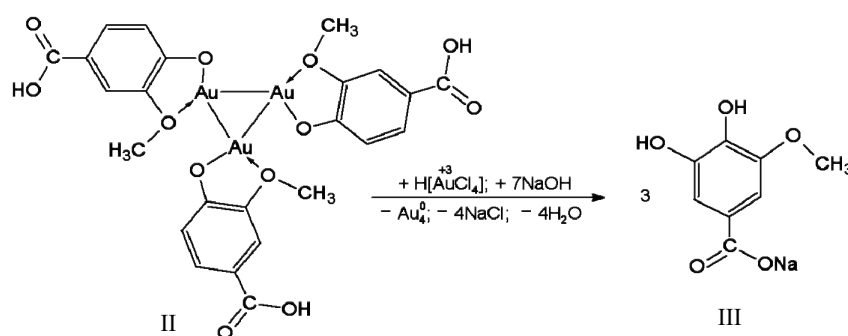
Окисник у цій стадії відновлюється до гідроген дихлороаурату, який у наступній

реакції утворює з ваніліновою кислотою триядерний кластерний комплекс (II):

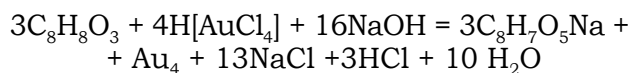


У наступній, третій стадії, в результаті подальшого окиснення тетрахлорауратною кислотою цей комплекс руйнується, вивільняючи кластер з чотирьох атомів Au.

Органічні ліганди при цьому зазнають двоелектронного окиснювального гідроксидування утворюючи 3-метокси 4,5-дигідроксибензену кислоту (III) за Елбсом:



Сумарне рівняння в молекулярній формі можна записати так:



Можна припустити, що саме сіль органічної кислоти III є тою речовиною яка формує на поверхні наночастинок захисну оболонку внаслідок адсорбції.

Одним із важливих завдань даного дослідження була розробка методики очистки гідрозолу від електролітів, присутність яких не дозволяє одержувати концентровані розчини золотих наночастинок. Традиційно така очистка здійснюється методом діалізу. Нами було зроблено спробу виконати знесення гідрозолу методом діалізу на мембрані з целюлози, але за 5 годин електропровідність гідрозолу знизилася лише на 1,3%. З огляду на низьку ефективність цього методу постійно тривають пошуки альтернативних способів очистки. Наприклад у (Куліца, 2020) запропоновано використовувати метод екстракційного розподілу між двома рідкими фазами.

Нами була розроблена техніка знесення, що ґрунтується на іонному обміні. Наночастинок золота мають на своїй поверхні адсорбовані аніони ванілінової

кислоти, для яких протиіонами у розчині є катіони натрію. Вони утворюють нерозчинні продукти з двозарядними катіонами, наприклад з  $\text{Ca}^{2+}$ , а отже при додаванні розчинної солі кальцію, вони випадають в осад. Після центрифугування на швидкості 3000 об/хв осад утворює щільний шар на дні центрифужної посудини. Після зливання надосадового розчину і промивки дистильованою водою осад диспергували в невеликому об'ємі води та додавали підібрану зарані кількість катіоніту КУ-2-8 у Na формі. Суміш збовтували 5 хв. Катіоніт відфільтровували через скляний фільтр. Після відділення зерен катіоніту на фільтрі осад висушували у чашці Петрі. При додаванні води до сухого осаду він знову може бути переведений у стан гідрозолу. Характерною особливістю шару сухого осаду є його низька електропровідність, що може свідчити про обмежену кількість контактів між власне металічними частинками.

Дослідження кристалічної структури наночастинок проводили методом рентгеноструктурного аналізу. Отримана дифрактограма наночастинок золота наведена на рис. 2.

Характерні піки при кутах розсіяння ( $2\theta$ ) близько  $48,6^\circ$ ,  $56,8^\circ$ ,  $84,5^\circ$ ,  $104,1^\circ$  і  $110,9^\circ$

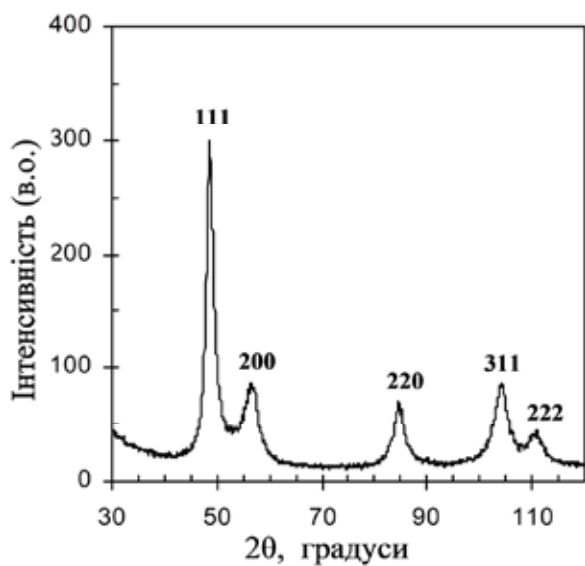


Рис. 2. Дифрактограма наночастинок золота ( $\lambda_{Fe} = 0,1936 \text{ nm}$ )

відповідають (111), (200), (220) і (311) гра-  
нецентрованої кубічній структурі металіч-  
ного золота. На дифрактограмі видно роз-  
ширення ліній порівняно із стандартом, що

пояснюється проявом розмірних ефектів  
утворених частинок. Врахування даної осо-  
бливості і використання формули Шеррера,  
дозволило розрахувати середній діаметр  
утворених наночастинок золота, який ста-  
новить 28 нм. Міжплощинна відстань одер-  
жаних наночастинок становить 0,2361 нм.  
Стала ґратки одержаних наночастинок  
золота становить 0,4089 нм. Даний резуль-  
тат добре узгоджуються зі значеннями стан-  
дартів (0,4079 нм, карта PDF Номер 4-0784).

Методом просвічуючої електронної  
мікроскопії було досліджено морфологію та  
розподіл за розмірами синтезованих нано-  
частинок золота. З рисунка 3 видно, що  
одержані наночастинки мають сферичну  
форму з розміром від 10 до 45 нм.

Матеріал, з якого складаються нано-  
частинки золота – це нульвалентне золото.  
Тому їх вольтамперометричне дослідження  
можна проводити лише в анодній ділянці  
потенціалів. В нашій роботі було знято  
циклічну вольтамперограму (ЦВА) залеж-  
ності для наночастинок і порошку масив-  
ного золота на фоні 1 М хлоридної кислоти  
(рис. 4). Золото з порошку наносили на пла-

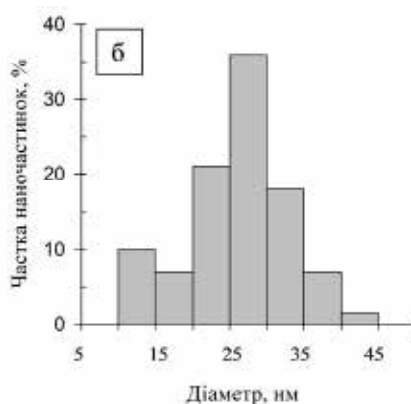
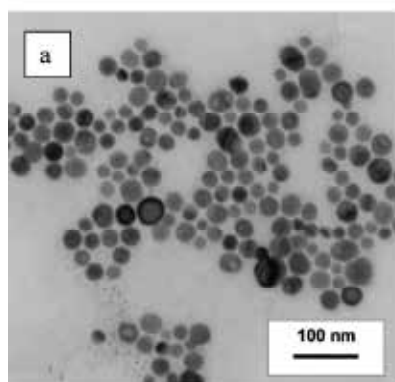


Рис. 3. ПЕМ зображення наночастинок золота (а) та їх розподіл за розмірами (б)

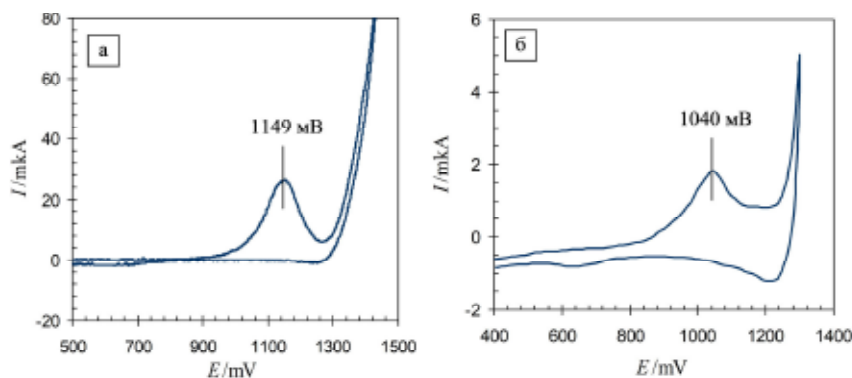
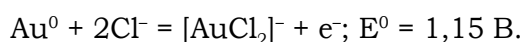


Рис. 4. ЦВА залежності для макроскопічного порошку (а) і наночастинок золота (б)  
на фоні 1 М НСІ. Швидкість сканування потенціалу 50 мВ/с

тиновий електрод механічним способом, проводячи площиною дискового електроду по невеликій кількості порошку на фільтрувальному папері. Імобілізація наночастинок здійснювалася висушуванням краплі гідрозолу на поверхні електрода.

На одержаних кривих спостерігається один максимум анодного струму. Потенціал окиснення макроскопічних частинок золота дорівнює 1,15 В, а для нанозолота його значення на 109 мВ нижче і дорівнює 1,04 В. Виходячи з потенціалу анодного окиснення макроскопічних частинок можемо зробити висновок про характер електродної реакції:



### Висновки

Продемонстровано ефективність використання природного ароматичного альдегіду

ваніліну в ролі відновника і стабілізатора у синтезі наночастинок золота. Визначено молярні співвідношення між реагентами в процесі формування наночастинок золота у ході відновлення іонів  $\text{Au}^{3+}$  ваніліном. Постульовано характер теоретично можливих реакцій перетворення органічного відновника у складі супрамолекулярного ансамблю та утворення атомарного кластера  $\text{Au}_4$ , як попередника наночастинок  $\text{Au}$ . Встановлено, що утворені наночастинок мають сферичну форму з середнім діаметром 35 нм та ГЦК ґраткою. Методом ЦВА встановлено, що електрохімічне окиснення наночастинок золота на платиновому електроді в хлоридному середовищі проходить до  $\text{Au}(\text{I})$ :  $\text{Au}^0 + 2\text{Cl}^- = [\text{AuCl}_2]^- + e^-; E^0 = 1.15 \text{ В.}$  Запропоновано метод очистки і концентрування золотого гідрозолу за методом іонного обміну на катіоніті КУ-2-8 у  $\text{Na}$  формі.

### References

- Abdelghany, A.M., Oraby, A.H., & Farea, M.O. (2019). Influence of green synthesized gold nanoparticles on the structural, optical, electrical and dielectric properties of (PVP/SA) blend. *Phys. B*, 560, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.02.029> [in English].
- Alle, M., Lee, S.-H., & Kim, J.-C. (2020). Ultrafast synthesis of gold nanoparticles on cellulose nanocrystals via microwave irradiation and their dyes-degradation catalytic activity. *J. Mater. Sci. Technol*, 41, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.003> [in English].
- Amina, S.J., & Guo, B. (2020). A Review on the Synthesis and Functionalization of Gold Nanoparticles as a Drug Delivery Vehicle. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 9823–9857. <https://doi.org/10.2147/IJN.S279094> [in English].
- Arya, S.S., Sharma, M.M., & Das, R.K. (2019). Vanillin mediated green synthesis and application of gold nanoparticles for reversal of antimicrobial resistance in *Pseudomonas aeruginosa* clinical isolates. *Heliyon*, 5, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02021> [in English].
- Bai, X., Wang, Y., Song, Z., Feng, Y., Chen, Y., Zhang, D., & Feng, L. (2020). The Basic Properties of Gold Nanoparticles and their Applications in Tumor Diagnosis and Treatment. *Int. J. Mol. Sci.*, 21, 2480. <https://doi.org/10.3390/ijms21072480> [in English].
- Brust, M., Walker, D., Bethell, D., Schiffrin, & Whiman, R. (1994). Synthesis of Thiol-derivatised Gold Nanoparticles in a Twophase Liquid-Liquid System. *J.Chem.Soc., Chem. Commun.*, 801–812. <https://doi.org/10.1039/C39940000801> [in English].
- Edwards, P.P., & Thomas, J.M. (2007). Gold in a Metallic Divided State – from Faraday to Present-Day Nanoscience. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 5480. <https://doi.org/10.1002/anie.200700428> [in English].
- Frens, G. (1973). Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions. *Nature physical science*, 241, 20–22. <https://doi.org/10.1038/physci241020a0> [in English].
- Hammami, I., Alabdallah, N.M., Aljomaa, A., & Kamoun, M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of King Saud University: Science*, 33(7), 101560. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560> [in English].
- Hu, X., Zhang, Y., Ding, T., Liu, J., & Zhao, H. (2020). Multifunctional gold nanoparticles: A novel nanomaterial for various medical applications and biological activities. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00990> [in English].
- Husen, A. (2017). Gold Nanoparticles from Plant System: Synthesis, Characterization and their Application. In: Ghorbanpour, M., Manika, K., Varma, A. (eds) *Nanoscience and Plant-Soil Systems. Soil Biology*, 4, 455–479. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8_17) [in English].

Kulua, I., Huang, R., Rotello, V.M. (2020). A modified and simplified method for purification of gold nanoparticles. *MethodsX*, 7, 103–107. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100896> [in English].

Litvin, V.A., & Minaev, B.F. (2014). The size-controllable, one-step synthesis and characterization of gold nanoparticles protected by synthetic humic substances. *Materials Chemistry and Physics*, 144, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.12.039> [in English].

Oliveira, A.E.F., Pereira, A.C., Resende, M.A.C., & Ferreira, L.F. (2023). Gold Nanoparticles: A Didactic Step-by-Step of the Synthesis Using the Turkevich Method, Mechanisms, and Characterizations. *Analytica*, 4 (2), 250–263. <https://doi.org/10.3390/analytica4020020> [in English].

Santhosh, P.B., Genova, J., & Chamati, H. (2022). Green Synthesis of Gold Nanoparticles: An Eco-Friendly Approach. *Chemistry*, 4, 345–369. <https://doi.org/10.3390/chemistry4020026> [in English].

Wilcoxon, J.P., Williamson, R.L., & Baughman, R. (1993). Optical properties of gold colloids formed in inverse micelles. *The journal of Chemical Physics*, 98 (12), 9933–9950. <https://doi.org/10.1063/1.464320> [in English].

Yenda, T.B., Jiglaire, C.J., & Khichane, I. (2022). Controlled synthesis of small water-soluble hybrid gold nanoparticles. *Frontiers in Mech. Eng.*, 8, N3, 37–45. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.824837> [in English].

Отримано: 29.04.2024

Прийнято: 13.05.2024