

Скиба М.І.

Український державний університет науки та технологій

Скиба Ю.М.

Український державний університет науки та технологій

Коваленко І.Л.

Український державний університет науки та технологій

Сорочкіна К.О.

Український державний університет науки та технологій

Воробйова В.І.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОДЕРЖАННЯ НАНОДИСПЕРСІЙ ЗОЛОТА НАДРІДИННИМ ПЛАЗМОВИМ РОЗРЯДОМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПЕРХЛОРАТ-АНІОНІВ

У статті здійснено дослідження застосування короткотривалого надрідинного плазмового розряду анодного типу для синтезу стабільних дисперсій нанозолота. Синтез наночастинок здійснювали із використанням класичного стабілізатора цитрату натрію. Досліджено спектральні характеристики поглинання в УФ-видимому діапазоні наночастинок золота, отриманих за різної концентрації $[Au^{3+}]$ та тривалості обробки анодним плазмовим розрядом. УФ-спектри Au НЧ виявили смугу поверхневого плазмонного поглинання між 530–600 нм, яка є результатом сформованих Au НЧ. Результати показали, що розмір Au НЧ можна регулювати в діапазоні 30–75 нм шляхом зміни концентрації $[Au^{3+}]$ солі золота в діапазоні значень 0,3–2,5 ммоль/л та тривалості синтезу наночастинок до 10 хв. Встановлено, що для досліджуваних концентрацій Au^{3+} обробка плазмовим розрядом протягом 3–10 хвилин призводить до утворення стабільних НЧ Au різного розміру та переважно сферичної форми із значенням дзета-потенціалу $-25 \div -30$ мВ. Досліджено сенсорні властивості одержаних наночастинок золота для колориметричного визначення амоній перхлорату АП (перхлорат-іонів) в водних середовищах. За оптимальних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при $\lambda = 600\text{--}650$ нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів ClO_4^- в діапазоні 5–25 мкмоль/л ($R^2 = 0,97$). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення формується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, про що свідчить зміна кольору розчинів з рожевого на фіолетовий. Смуга поверхневого плазмонного резонансу Au НЧ при $\lambda = 540$ нм змістилася до 640 нм в результаті агрегації. Вимірювання проводили шляхом ділення поглинання при 650 нм на поглинання при 540 нм і співвіднесення цього співвідношення з концентрацією ПА. Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення амоній перхлорату: межа виявлення ($LOD = 5,81$ мкмоль/л) та межа кількісного визначення ($LOQ = 17,61$ мкмоль/л).

Ключові слова: дисперсії наночастинок, золото, плазмохімічний синтез, перхлорат аніон, сенсор, колориметрія, агрегація.

Постановка проблеми. Дисперсії благородних металів (Au, Ag), наразі є одним із найбільш досліджуваних та комерціалізованих наноматеріалів [1–2]. Значною кількістю досліджень встановлено і доведено взаємозв'язок між: «методом синтезу нанометалів», «характеристиками наноматеріалів» і «ступенем прояву їх властивостей» [3–4]. Від-

так незначні зміни умов/підходів синтезу суттєво впливають на параметри наночастинок і змінюють властивості всієї наносистеми, що ускладнює, а іноді й унеможлиблює отримання наночастинок з контрольованими фізико-хімічними характеристиками та властивостями. Особливо складними та невирішеними проблемами, на яких зосереджено

зусилля вітчизняних та закордонних вчених, є, по-перше: уніфікація методичних підходів і технологій синтезу нанометалів; по-друге: розвиток технологій отримання з можливістю їх функціоналізації для різних галузей [5–8]. Перспективним в розрізі вирішення питання уніфікації методичних підходів є плазмово-рідинний підхід синтезу та модифікації нанометалів, що також є більш «екологічною» альтернативою традиційним методам синтезу наночастинок [9–10]. Стосовно функціоналізації нанометалів для потреб різних галузей особливо актуальним наразі є налаштування сенсорних колориметричних властивостей нанометалів до ряду політантів, що потрапляють до водних середовищ та ґрунтів внаслідок військових дій.

Забруднюючі речовини, що потрапляють у водні об'єкти в наслідок воєнних дій, як правило, це компоненти спорядження боєприпасів та засобів мінування, продукти неповної детонації ракет, продукти вибуху, похідні забруднюючих речовин, які трансформуються у ґрунтах та водному середовищі [11–13]. Неорганічні вибухові речовини, завдяки своїй високій стабільності та складній структурі, часто складаються з неорганічних окислювачів, таких як нітрат калію, хлорат калію або перхлорат калію та палива, такого як вугілля, сірка або металевий порошок. Перхлорат, зазвичай зустрічається у формі хлорної кислоти та її солей, таких як перхлорат амонію (NH_4ClO_4), перхлорат калію (KClO_4) і перхлорат натрію (NaClO_4) [11]. Перхлорат-аніони потрапляючи у ґрунт та поверхневі води накопичуються в рослинах, а потім потрапляють в організм людини. Тому, наразі актуальними є дослідження щодо розвитку аналітичних методів із застосуванням нанометалів для виявлення перхлорат-аніонів і водних середовищах, ґрунтах, харчових продуктах [11–13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найвні результати як фундаментальних, так і прикладних досліджень щодо використання плазмових розрядів для синтезу нанометалів, свідчать, що умови генерації можуть значно відрізнитися залежно від багатьох критеріїв і впливають на характеристики та властивості отриманих нанометалів. Надрідинний розряд анодного типу був доведений як ефективний метод для створення нанодисперсій срібла в попередніх дослідженнях [8–10]. Ці дослідження показали, що анодний тип плазмового розряду може ефективно виробляти нанодисперсії срібла як з різними типами іонних, так і неіонних стабілізаторів [8–10]. Крім того, було продемонстровано, що тип стабілізатора

разом із варіюванням параметрів процесу, таких як початкова концентрація прекурсора, кількість стабілізатора (співвідношення прекурсора до стабілізуючого агента) і тривалість синтезу наночастинок, забезпечують контроль над розмірними характеристиками та властивостями наночастинок у дисперсіях [8–10].

Наукові роботи закордонних та вітчизняних фахівців щодо розробки матеріалів та методів оперативного визначення перхлорат-аніонів сполук свідчать, що особливо перспективними є скринінгові системи різного складу із застосуванням наноматеріалів, модифікованих різними сполуками: іонними рідинами, барвниками (метиленовий синій) та ін. [11–14]. Механізм виявлення, як правило, ґрунтувалася на зміні кольору через агрегацію наночастинок чи сильному плазмонному посиленні, що виникає внаслідок електростатичної взаємодії між сенсором і аналізом [11–14]. Встановленим наразі є і той факт, що колориметрична активність наночастинок напряму залежить і визначається їх параметрами (розмір, форма, дисперсність тощо) та стабілізаторами-функціоналізаторами, що використовуються [8–10].

Постановка завдання. Тому метою роботи було здійснити дослідження щодо ефективності застосування надрідинного плазмового розряду анодного типу для синтезу дисперсій нанозолота, характеристика їх фізико-хімічних параметрів. Дослідження сенсорної активності для колориметричного виявлення амоній перхлорату у модельних водних розчинах.

Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень

Одержання стабілізованих колоїдних розчинів наночастинок золота НЧ здійснювали шляхом обробки суміші попередньо одержаних водних розчинів прекурсору $[\text{Au}^{3+}]$ (0,1–3,0 ммоль/л) із солі тетрахлороаурату водню HAuCl_4 та реагенту-стабілізатору [СТАБ] = цитрату натрію при мольному співвідношенні $[\text{Me}]:[\text{СТАБ}]=1$ розрядом плазми, що формується в реакторі [8–10]. Параметри формування плазмового розряду: сила струму $I=120$ мА і $P=0,8$ МПа. Концентрація Au^{3+} . Загальний об'єм розчину $V=40$ мл. Поглинання одержаних дисперсій залежно від умов синтезу (концентрація, тривалість синтезу) реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-Vis UV-5800PC з використанням кварцових кювет.

Дослідження колориметричної активності одержаних нанодисперсій здійснювали відповідно до наступної методики [12]. Змішували

пробу зразка амоній перхлорату (АП) концентрації $1,0 \times 10^{-3} \div 7,5 \times 10^{-5}$ моль/л ($V=1$ мл) з розчином Au НЧ ($V=0,3$ мл) загальний об'єм 1,3 мл. Через 15 хвилин реакції зміни поглинання зразків (А від. од.) визначали при $\lambda = 520\text{--}650$ нм (рис. 1). Для визначення діапазону лінійності використовували УФ-спектрофотометричну методику аналізу ПА (графік, побудований в координатах: А, (оптична густина розчину) – С, мкмоль/л (концентрація розчину ПА).

Для здійснення кількісної оцінки було визначено скореговане значення поглинання (A'), за рівнянням рівнянні (1):

$$A' = (A_{650} / A_{520})_з - (A_{650} / A_{520})_к \quad (1)$$

При наведеному вище методі розрахунку значення абсорбції зразок не залежав від кількості наночастинок, а калібрувальне рівняння було отримано з корегованим значенням поглинання ($A'_{650/520}$).

Значення межі виявлення (LOD) та кількісного визначення (LOQ) розраховували на основі параметрів градууювальної прямої (S_a – стандартне відхилення вільного члена та b – тангенса нахилу) відповідно до рівнянь (2, 3):

$$LOD = 3,3 S_a / b ; \quad (2)$$

$$LOQ = 10 S_a / b. \quad (3)$$

Отримані експериментальні результати.

Проаналізовано плазмохімічне одержання наночастинок (НЧ) золота, стабілізованих цитратом натрію, за участю катодного розряду при різних початкових концентраціях прекурсора Au^{3+} та зміні тривалості впливу плазми на розчин. На основі взаємозв'язку між оптичними характеристиками НЧ Au (спектри локального поглинання) і їх поверхневими властивостями, а також роз-

поділом розмірів НЧ (індекс полідисперсності), зроблено ряд висновків про закономірності у формуванні та зростанні наночастинок та їх характеристик під час плазмохімічного синтезу. За взаємозв'язком між оптичними характеристиками наночастинок НЧ Au (смуги ЛППР), поверхневими характеристиками та розподілом НЧ за розмірами (індекс полідисперсності) зроблено ряд висновків щодо закономірностей формування, росту НЧ та їх характеристик при плазмохімічному синтезі.

На рис. 2 наведено спектри плазмохімічно одержаних колоїдних розчинів НЧ Au при різних початкових концентраціях та інтервалах дії розряду плазми на вихідний розчин. Як відомо [1–10], плазмонний резонанс НЧ Au з діаметром $\sim 20\text{--}80$ нм локалізований в УФ-частині видимого спектру (близько $\sim \lambda = 520\text{--}600$ нм для водних колоїдів золота), що пояснює червоний/рожевий/фіолетовий колір таких колоїдних розчинів. Відтак під час дії розряду плазми спостерігали зміну кольору розчину прекурсору золота під впливом КНП: світло жовтий \rightarrow безбарвний \rightarrow рожевий \rightarrow червоний (перехід кольорів) \rightarrow червоно-фіолетовий, що наочно свідчать про умовно ступеневі хімічні перетворення в процесі синтезу наночастинок Au.

Встановлено, що в досліджуваному діапазоні початкових концентрацій розчинів прекурсору та часових інтервалах впливу плазми на водні розчини результатом обробки є формування наносистем, у яких метал знаходиться в нанорозмірному металевому стані (наночастинки Au у водному середовищі).

В діапазоні різних вихідних концентрацій ($Au^{3+} = 0,06\text{--}2,5$ ммоль/л) при еквівалентному співвідношенні $[Au^{3+}]/[ЦИТ] = 1:1$ спостерігається формування характерних для колоїдних роз-

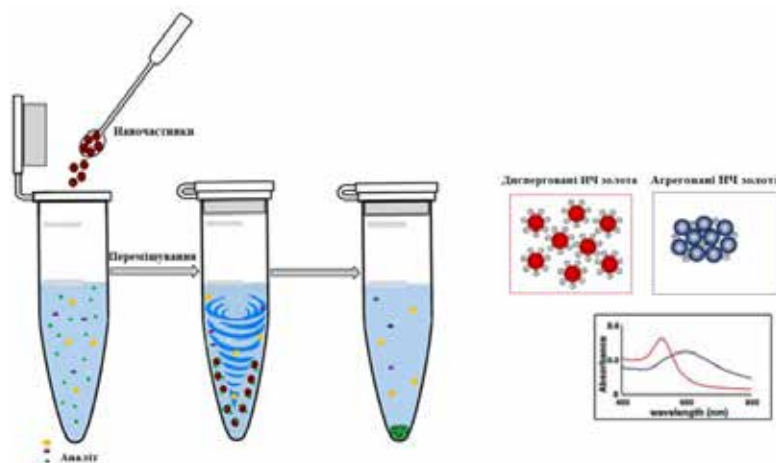


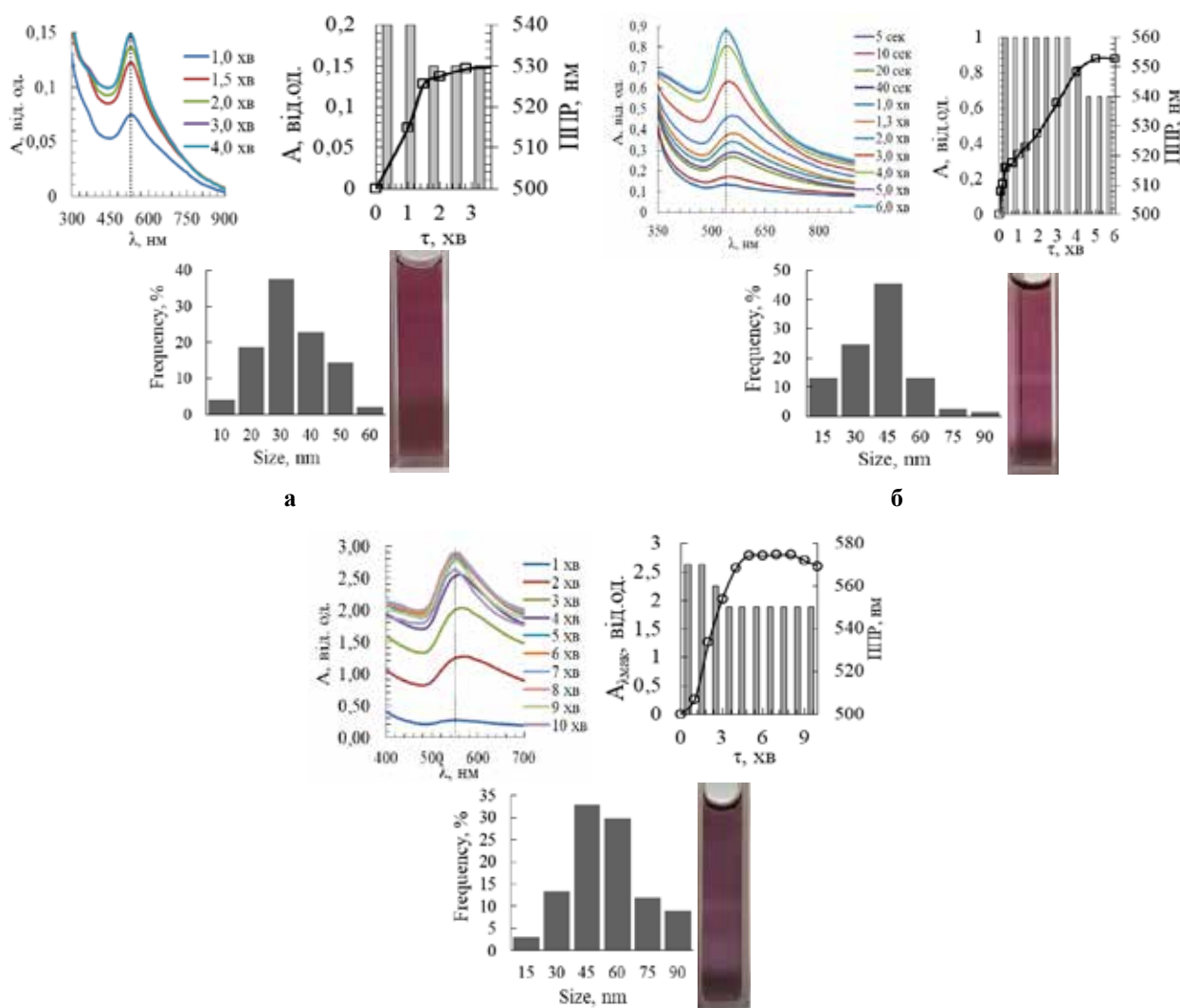
Рис. 1. Схематичне зображення взаємодії амоній перхлорату (АП) та наночастинок золота

чинів наночастинок золота інтенсивні піки ЛППР при 530–560 нм з $A=0,15-3,0$ (рис. 2, 3). При цьому є зсув піку ЛППР в довгохвильову зону з $\lambda=530$ нм до 550 нм, а, як наслідок, і збільшення середнього розміру наночастинок в утворюваних системах (дисперсіях наночастинок) та відповідне розподілення за розміром при збільшенні вихідної концентрації прекурсору SAu^{3+} та збереженні інших параметрів синтезу.

Аналізуючи кінетику зміни максимуму поглинання ЛППР в одержаних системах, середній розмір утворюваних НЧ, змінюється під час синтезу, і в значній мірі залежить від початкової концентрації Au^{3+} та тривалості обробки розрядом. 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 ($A = 0,1 \div 0,15$ від.од.), що характерні НЧ з середнім розміром ~ 10–80 нм. Видно, що час необхідний для прояву піку закономірно збільшується при підвищенні початкових концентрацій Au^{3+} , що є закономірним. Також встановлено, що збільшення тривалості дії розряду на розчині призводить до інтенсивного підвищення інтенсивності поглинання із різним зазначенням зміщення піку ЛППР / в довгохвильову область або її відсутності, що свідчить про ріст кількості (концентрації) утворюваних НЧЗ, зміну їх розміру і полідисперсності до формування «умовно» остаточної стабілізованої системи та переходу до часткової агрегації.

Здійснено дослідження сенсорної активності одержаних дисперсій наночастинок золота, стабілізованих цитратом натрію при колориметричному



Au^{3+} 0,06 ммоль/л (а), Au^{3+} 0,3 ммоль/л (б), 2,5 ммоль/л (в) при $[\text{Au}^{3+}]/[\text{Цит}]=[1]:[1]$

Рис. 2. Спектри дисперсій нанозолота залежно від тривалості дії розряду плазми на вихідний розчин $[\text{Au}^{3+}]/[\text{Цит}]$ та початкової концентрації прекурсору

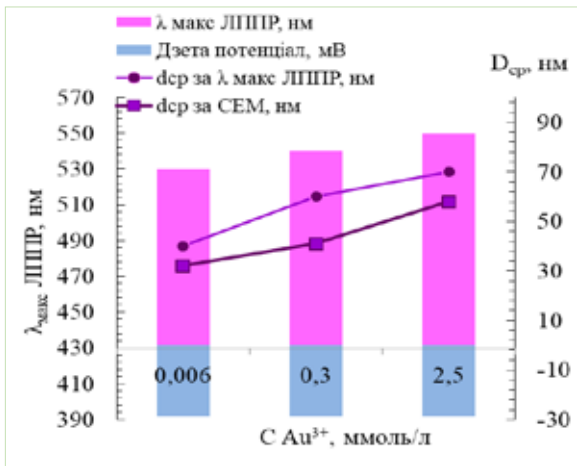


Рис. 3. Залежність характеристик (дзета потенціал, пік ЛППР, середній розмір наночастинок, визначені методом скануючої мікроскопії та за значенням піку ЛППР) дисперсій наночастинок золота від початкової концентрації прекурсору

виявлення перхлорат-аніонів в водних розчинах. Під час визначення перхлорат-аніонів у різних концентраціях розчину (5–25 мкМ) відзначено зміни кольору від червоно/фіолетового до синього. На УФ-спектрах це характеризується появою нового піку у спектрі поглинання в діапазоні $\lambda = 600 - 800$ нм, що утворюється внаслідок агрегації наночастинок. Це ускладнювало вибір конкретної довжини хвилі піку для всіх вимірювань. Для моніторингу змін поверхневого плазмонного резонансу було визначено поглинання при довжині хвилі $\lambda = 650$ нм. Під час збільшення поглинання при 650 нм спостерігалось зменшення поглинання початкового піку поверхневого плазмонного резонансу при 520 нм.

Спектри агрегованих Au НЧ для різних концентрацій перхлорат-аніон показані на рис. 4.

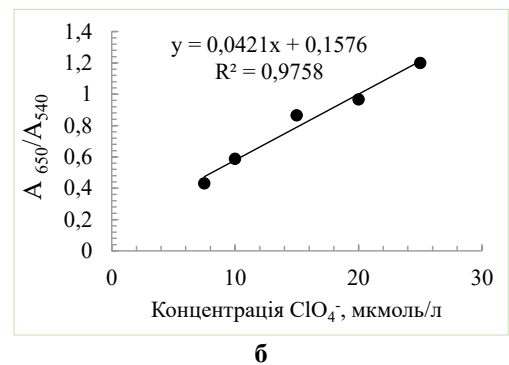
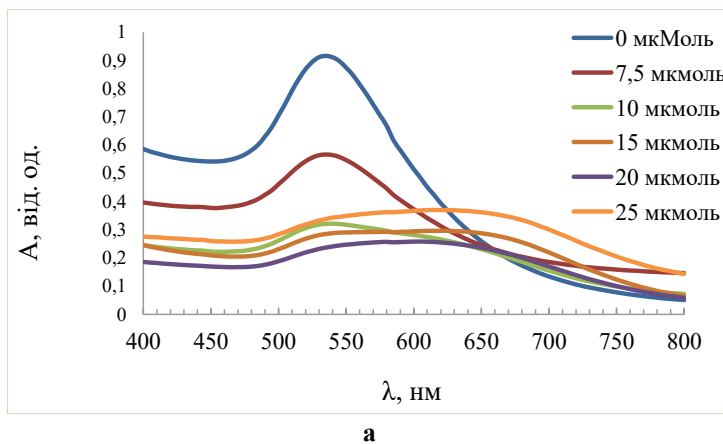


Рис. 4. Колориметричне визначення перхлорат амонію із використанням наночастинок золота: а – спектри поглинання УФ-спектри колориметричного сенсору на основі Au НЧ; б – побудований графік залежності A_{650}/A_{540} від концентрацій АП

Зміна кольору, що було одержано при застосуванні дисперсій наночастинок золота запропонованого, як сенсор до розчинів АП в діапазоні концентрацій $5,0 \div 25,0$ мкмоль/л зображено на рис. 3.

Одержано наступне рівняння калібрувальної лінії:

$$A'_{650/520nm} = 4.2 \cdot 10^2 C_{ПА} + 1,56 \quad (r=0.98) \quad (4)$$

де $A'_{650/520}$ – скориговане значення A_{650}/A_{520} (відповідно до рівняння (1)), а $C_{ПА}$ – концентрацією перхлорат-аніон (мкмоль/л) у кінцевому розчині.

В табл. 1 наведені основні валідаційні характеристики кількісного визначення ПА: інтервал лінійності градуовального графіку у діапазоні концентрацій; коефіцієнти регресії рівняння градуовального графіку, які розраховані методом найменших квадратів, межа виявлення аналіту, межа кількісного визначення.

Таблиця 1

Колориметрична активність

Зразок НЧ золота	Аналіт	Лінійний діапазон, мкмоль/л	Значення межі виявлення LOD, мкмоль/л	Межа кількісного визначення LOQ, мкмоль/л	Коефіцієнти варіації, у відсотках (N=5)
Au/Цит	ПА	5,0–25,0	5,81	17,61	1,75

Висновки. Здійснено синтез наночастинок золота із використанням над рідинного плазмового розряду при різних концентраціях $[Au^{3+}]$ та тривалостях обробки анодним плазмовим розрядом. Наночастинки характеризуються смугою поверхневого плазмонного поглинання в межах

$\lambda = 530 - 600$ нм, що характерно наночасткам з середнім розміром в діапазоні 30–75 нм. Результати вказують, що розмір наночастинок золота можна регулювати, змінюючи концентрацію $[\text{Au}^{3+}]$ солі золота від 0,3 до 2,5 ммоль/л та тривалість синтезу. Встановлено, що при досліджених концентраціях Au^{3+} обробка плазмовим розрядом протягом 3–10 хвилин призводить до утворення стабільних наночастинок золота різного розміру та переважно сферичної форми із значенням дзета-потенціалу $-25 \div -30$ мВ. Досліджено сенсорні властивості отриманих наночастинок золота для колориметричного визначення амоній перхлорату (перхлорат-іонів) у водних розчинах. За оптимальних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при 600–650 нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів ClO_4^- в діапазоні 5–25 мкмоль/л ($R^2 = 0,97$). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення базується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, що призводить до зміни кольору розчину з рожевого на фіолетовий. Межа виявлення LOD становить 5,81 мкмоль/л, межа кількісного визначення LOQ становить 17,61 мкмоль/л.

тричного визначення амоній перхлорату (перхлорат-іонів) у водних розчинах. За оптимальних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при 600–650 нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів ClO_4^- в діапазоні 5–25 мкмоль/л ($R^2 = 0,97$). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення базується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, що призводить до зміни кольору розчину з рожевого на фіолетовий. Межа виявлення LOD становить 5,81 мкмоль/л, межа кількісного визначення LOQ становить 17,61 мкмоль/л.

Список літератури:

1. Burlec A.F., Corciova A., Bovev M., Batir-Marin D., Mircea C., Cioanca O., Danila G., Danila M., Bucur A.F., Hancianu M. Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles. *Pharmaceuticals*. 2023. (16). P. 1410. <https://doi.org/10.3390/ph16101410>
2. Altammar K.A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Front. Microbiol.* 2023. (14). P. 1155622. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
3. Yaqoob S.B., Adnan R., Rameez Khan R.M., Rashid M. Gold, Silver, and Palladium Nanoparticles: A Chemical Tool for Biomedical Applications. *Front. Chem.* 2020. (8). P. 376. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00376>
4. Santhosh P.B., Genova J., Chamati H. Green Synthesis of Gold Nanoparticles: An Eco-Friendly Approach. *Chemistry*. 2022. 4 (2). P. 345–369. <https://doi.org/10.3390/chemistry4020026>
5. Hammami I.; Alabdallah N.M.; Jomaa A.A.; Kamoun M. Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *J. King Saud-Univ. Sci.* 2021. 33. P. 101560. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/na/d1na00711d>
6. Hovhannisyan A., Janik M., Woszczak L., Khachatryan G., Krystyan M., Lenart-Boroń, A., Stankiewicz K., Czernecka N., Duraczyńska D., Oszczyda Z. et al. The Preparation of Silver and Gold Nanoparticles in Hyaluronic Acid and the Influence of Low-Pressure Plasma Treatment on Their Physicochemical and Microbiological Properties. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. (24). P. 17285. <https://doi.org/10.3390/ijms242417285>
7. Faridul Hasan K.M., Xiaoyi Liu, Zhou Shaoqin, Péter György Horváth, Miklós Bak, László Bejő, György Sipos, Tibor Alpár, Functional silver nanoparticles synthesis from sustainable point of view: 2000 to 2023 – A review on game changing materials. *Heliyon*. 2022. (8 (12)). e12322. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12322>
8. Skiba M.I., Vorobyova V.I., Kosogina I.V. Preparation of Silver Nanoparticles in a Plasma-Liquid System in the Presence of PVA: Antimicrobial, Catalytic, and Sensing Properties. *Journal of Chemistry*. 2020. (2020). Article ID 5380950. 9 p. <https://doi.org/10.1155/2020/5380950>
9. Skiba, M.I., Vorobyova, V.I., Pivovarov, O.A., Sorochkina, K.O., Shakun, A.S. Plasma-chemical-assisted synthesis of silver nanoparticles using grape pomace waste. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. 2020 (1). P. 53–60.
10. Skiba M., Zaporozhets J., Vorobyova V. Gold nanoparticles with natural polymer synthesized by plasma-liquid interactions: Size-control, characterization and colorimetric detection of melamine based on the size effect of gold nanoparticles. *Nano-Structures and Nano-Objects*. 2024. 37. 101113. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101113>
11. Андрусичина І. М. Еколого-гігієнічний моніторинг перхлоратів у водах різного призначення в Україні. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2013. 2. С. 34–43. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vvt_2013_2_6
12. Büşra Keskin, Ayşem Üzer, Reşat Apak. Colorimetric sensing of ammonium perchlorate using methylene Blue-Modified gold nanoparticles. *Talanta*. 2020. 206. 120240. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120240>
13. Büşra Keskin, Ayşem Üzer, Reşat Apak. Ionic Liquid-Modified Gold Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor for Perchlorate Detection via Anion- π Interaction. *ACS Omega*. 2022. 7 (32). P. 28065–28075. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02078>
14. Sun, H., Liang, Y., Zhou, L. et al. Visual detection of perchlorate in aqueous solution using alkali methylene blue. *ANAL. SCI.* 2022. (38). P. 525–531 <https://doi.org/10.2116/analsci.21P174>

Skyba M.I., Skyba Yu.M., Kovalenko I.L., Sorochkina K.O., Vorobiova V.I. PREPARATION OF GOLD NANODISPERSIONS BY SUPERFLUID PLASMA DISCHARGE AND THEIR APPLICATION FOR COLORIMETRIC DETECTION OF PERCHLORATE ANIONS

The article investigates the use of a short-term superfluid plasma discharge of the anode type for the synthesis of stable dispersions of nanogold. Synthesis of nanoparticles was carried out using the classic sodium citrate stabilizer. Spectral characteristics of absorption in the UV-visible range of gold nanoparticles obtained at different concentrations of $[Au^{3+}]$ and duration of treatment with an anodic plasma discharge were studied. UV spectra of Au NPs revealed a surface plasmon absorption band between 530–600 nm, which is the result of the formed Au NPs. The results showed that the size of Au NPs can be adjusted in the range of 30–75 nm by changing the concentration of $[Au^{3+}]$ gold salt in the range of 0.3–2.5 mmol/l and the duration of nanoparticle synthesis up to 10 min. It was established that for the studied concentrations of Au^{3+} , treatment with a plasma discharge for 3–10 minutes leads to the formation of stable Au NPs of various sizes and mostly spherical shapes with a zeta potential value of $-25 \div -30$ mV. The sensory properties of the obtained gold nanoparticles for the colorimetric determination of ammonium perchlorate AP (perchlorate ions) in aqueous media were studied. Under optimal model conditions, the absorption of UV-visible radiation at $\lambda = 600$ –650 nm showed a linear dependence on the concentration of perchlorate ClO_4^- anions in the range of 5–25 $\mu\text{mol/l}$ ($R^2 = 0.97$). It has been demonstrated that the method of colorimetric determination is formed on the aggregation of plasma-chemically obtained nanoparticles upon interaction with the analyte, which is evidenced by the change in the color of the solutions from pink to purple. The surface plasmon resonance band of Au NPs at $\lambda = 540$ nm shifted to 640 nm as a result of aggregation. Measurements were made by dividing the absorbance at 650 nm by the absorbance at 540 nm and correlating this ratio with the PA concentration. The main validation characteristics of the quantitative determination of ammonium perchlorate were established: the limit of detection ($LOD = 5.81 \mu\text{mol/l}$) and the limit of quantification ($LOQ = 17.61 \mu\text{mol/l}$).

Key words: nanoparticle dispersions, gold, plasma chemical synthesis, perchlorate anion, sensor, colorimetry, aggregation.