

УДК 546.57:541.64:661.183.2:577.152.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/35>

Скиба Ю.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скиба М.І.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Коваленко І.Л.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСТРАКТІВ, ОТРИМАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ ГЛИБОКИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ

У статті здійснено дослідження ефективності використання екстрактів, отриманих у середовищі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) на основі холін хлориду для синтезу стабільних дисперсій наночастинок золота. НЕР на основі хлориду холіну було використано як нову альтернативу традиційним розчинникам для ультразвукової екстракції речовин з рослинної сировини, зокрема на прикладі шкірки банану (*Musaceae*). Методом теоретичних розрахунків із використанням *Analytical GREENness calculator* здійснено порівняння екстракції із використанням НЕР та традиційною екстракцією етанолом/водою. Наночастинки золота були синтезовані шляхом відновлення водного розчину гідрату тетрахлораурату (III) водню ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) з використанням отриманих екстрактів НЕР трьох типів: холін хлорид : ксилітол, холін-хлорид : пролін, холін хлорид : сечовина. Було встановлено, що вміст екстрагованих флавоноїдів, за допомогою досліджуваних складів НЕР на основі холін-хлориду становить 70–460 мг ЕК/100 г і залежить від складу НЕР. Визначене значення антиоксидантної активності одержаних екстрактів становив методом DPPH ((2,2-дифеніл-1-пікрілгідразил)) становив НЕР-1 (50 мгЕАК/100 г) > НЕР-2 (300–340 мгЕАК/100 г) > НЕР-3 (450–460 мгЕАК/100 г). Було встановлено, що екстракти бананової шкірки, отримані у досліджуваних середовищах НЕР, дозволяють синтезувати сферичні наночастинки золота (Au NC). Одержані наночастинки характеризуються максимальним піком плазмонного резонансного поглинання приблизно при $\lambda = 550\text{--}565$ нм з $A = 0,2\text{--}0,5$ від. од. до 1,8–2,0 при збільшенні вихідної концентрації іонів золота з 0,3 ммоль/л до 3,0 ммоль/л. Встановлено, що технологічно доцільні параметри синтезу: співвідношення розчину прекурсор з екстрактом НЕР 1:10 (об'єм/об'єм), $\tau = 30\text{--}60$ хв при температурі 50–60 °С. Методом динамічного світлорозсіювання встановлено, що діапазон середнього розміру наночастинок становить 50–61 нм. Встановлено, що дисперсії одержані в середовищі НЕР є стабільними до агрегації, про що свідчать значення дзета-потенціалу $\zeta = -33 \div -36$ мВ.

Ключові слова: металічні наночастинки, характеристика, оптичні властивості, стабільність, синтез, низькотемпературний евтектичний розчинник, екстракти.

Постановка проблеми. Наночастинки благородних металів завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Серед них особливу увагу привертають наночастинки золота, які демонструють широкий спектр функціональних характеристик, зокрема каталітичну активність, біосумісність, антиоксидантні властивості, і мають високий потенціал для використання в харчовій промисловості, біомедичних технологіях, медицині, фармацевтиці, каталізі, косметології тощо [1–2]. Тому за даними маркетингових досліджень (рис. 1) глобальний ринок

дисперсій наночастинок золота у 2024 році оцінювався приблизно в 0,13 млрд доларів США, а до 2033 року очікується, що він досягне 0,36 млрд доларів США, зростаючи зі сукупним річним темпом зростання (CAGR) близько 12,4% з 2025 по 2033 рік. У зв'язку з цим активно зростає інтерес до вивчення методів одержання наночастинок металів, серед яких особливої популярності набувають не лише фізичні та хімічні підходи, а й екологічно безпечні методи «зеленого» синтезу [1–3].

На сьогодні зелений синтез базується переважно на використанні рослинних екстрактів,

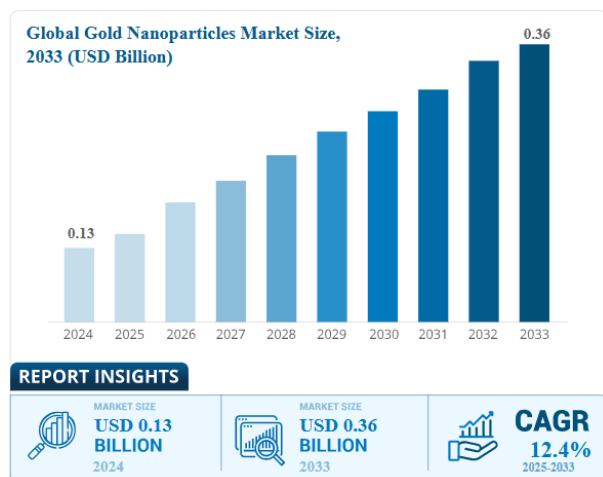


Рис. 1. Маркетингові дослідження сучасного стану та перспектив ринку дисперсій наночастинок золота

отриманих з широкого переліку природної рослинної та/або агросировини (аграрних відходів). Ці біологічні матеріали містять поліфенольні сполуки, які вилучені в екстракти здатні відновлювати іони металів, сприяючи утворенню наночастинок за умов контролю параметрів синтезу. Ключовим параметром, що забезпечує ефективність та контролює фізико-хімічні параметри наночастинок є якісний та кількісний склад екстрагованих сполук [4, 5]. Останній напряму залежить від типу екстракції, розчинника та параметрів екстракції.

Серед альтернатив до традиційних токсичних розчинників дедалі більшої популярності набувають екологічно безпечні системи, зокрема низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) на основі холін хлориду. У поєднанні з відповідними донорами, такими як органічні кислоти чи поліоли, він утворює стабільні евтектичні суміші. Вони привертають увагу завдяки своїй низькій токсичності, біорозкладності та доступності [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдяки своїй здатності створювати екологічно чисті, стабільні та високоефективні розчинники, системи на основі хлориду холіну вважаються ідеальними для «зеленого» виділення поліфенольних сполук. Відтак автори [2, 3, 6, 7] оцінили використання глибоких евтектичних розчинників на основі ([Ch]Cl) та карбоновими кислотами, для екстракції фенольних сполук з листя оливи. Ці екстракти потім порівнювали з екстрактами, отриманими з використанням етанолу. Доведено, що ефективність НЕР перевищує навіть такі традиційні розчинники, як вода, етанол, метанол та їх суміші – за більшістю

показників вони перевершують навіть 30% етанол [6–9]. Результати авторів [2, 3] показали, що найбільш придатними природними низькотемпературними евтектичними розчинниками (NADES) для екстракції біологічно активних сполук є суміші холін хлориду з яблучною кислотою (ChChl:яблучна кислота) (загальний вміст фенольних сполук: 1053 мг галової кислоти еквівалент (ГАК)/100 г; загальний вміст флавоноїдів (ЗВФ): 94,7 мг/100 г; антиоксидантна активність (АК): 430 мг/100 г) та хлориду холіну з гліцерином (ChChl:Gly) (ЗВФ: 169 мг/100 г; АК: 416 мг/100 г).

Окрім застосування для екстракції, НЕР набули поширення і як середовище для «зеленого» синтезу наночастинок. Зокрема, розчинники, створені на основі хлориду холіну та донора водневих зв'язків, виявилися ефективним і доступним підкласом іонних рідин із низьким впливом на довкілля [7, 10]. Їхня здатність добре розчиняти метали робить такі системи придатними для синтезу наноматеріалів з високим екологічним потенціалом. В роботі авторів [10] було здійснено добір складових для синтезу екологічних іонних на основі квантово-хімічних розрахунків, серед яких і склади НЕР на основі холін хлориду: холін хлорид : ксилітол; холін-хлорид : пролін; холін хлорид:сечовина. Проте наразі відсутні данні їх ефективності як екстрагентів біологічно активних сполук та середовищ синтезу наночастинок золота.

Банани (Musaceae) належать до провідних сільськогосподарських культур світу як за обсягами виробництва, так і за рівнем торгівлі, що постійно зростають задля задоволення глобального попиту. Одним із основних побічних продуктів переробки бананів є бананова шкірка, яка становить приблизно 35% маси плоду. Згідно з сучасними дослідженнями, бананова шкірка є цінним джерелом біоактивних речовин. Ці компоненти можуть бути ефективно екстраговані та застосовані для синтезу наночастинок золота [11].

Постановка завдання. Тому мета роботи – встановити ефективність різних складів глибоких евтектичних розчинників (ГЕР) на основі хлориду холіну для екстракції біоактивних сполук із рослинної сировини, а також оцінити придатність отриманих екстрактів для синтезу наночастинок золота.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень.

Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) на основі холін хлориду та ксилітолу,

проліну або сечовини готували у молярному співвідношенні 1:1 шляхом нагрівання суміші до 60–80 °С з перемішуванням до утворення гомогенного розчину. Для ультразвукової екстракції наважку подрібненої бананової шкірки змішували з НЕР при співвідношенні Т:Р = 1:45. Після цього суміш обробляли ультразвуком на частоті близько 40 кГц протягом досліджуваного інтервалу часу (10–30 хвилин) при температурі 30–40 °С. Після екстракції отриману суміш центрифугували та фільтрували для відокремлення твердих часток і отримання прозорого екстракту для подальшого використання. Для одержання НЕР зважені маси заданих інгредієнтів змішували в лабораторному стакані за допомогою магніту та поміщали на магнітну мішалку при температурі 60–80 °С.

Для визначення загального вмісту флавоноїдів 0,5 мл екстракту змішували зі 1,5 мл 96% етанолу, 0,1 мл 10% розчину хлориду алюмінію, 0,1 мл 1 М розчину ацетату калію та 2,8 мл дистильованої води у скляній пробірці. Контрольний зразок готували за аналогічною процедурою, проте замість хлориду алюмінію додавали 0,1 мл дистильованої води. Після 30 хвилин інкубації проводили вимірювання оптичної щільності при довжині хвилі 415 нм. Для побудови калібрувальної кривої використовували стандартні розчини кверцетину з концентраціями у межах 10–100 мг/л. Отримані результати виражали у г еквівалентів кверцетину на 100 г сухої маси зразка (мг ЕК/100 г).

Таблиця 1
Склад НЕР, що використовували для екстракції та синтезу наночастинок золота [10]

Склад НЕР	Склад	Молярне співвідношення
НЕР 1	Холін хлорид : ксилітол	5:2
НЕР 2	Холін-хлорид : пролін	1:1
НЕР 3	Холін хлорид:сечовина	1:2

Антиоксидантну активність зразків оцінювали відносно стандартної кривої для аскорбінової кислоти методом з DPPH [12] у мг еквівалентів аскорбінової кислоти на 100 г зразка.

Для одержання розчину наночастинок золота гідрохлорид золота (III) ($\text{HAuCl}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) розчиняли у деіонізованій воді до отримання розчину з концентрацією 1–3,0 мМ. Синтез наночастинок золота здійснювали шляхом змішування розчину прекурсору з екстрактом НЕР

у співвідношенні 1:10 (об'єм/об'єм), після чого реакційну суміш нагрівали до 60–80 °С при постійному перемішуванні. Про формування наночастинок золота свідчить зміна забарвлення розчину від блідо-жовтого до рожевого-червоного або фіолетового кольору, що характерно плазмонному резонансу поверхні (ППР). Оптичні спектри колоїдних розчинів реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-5800PC (поглинання в діапазоні 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.

Для перевірки достовірності експериментальних даних всі дослідження проводили мінімум три рази. Отримані результати оброблювали за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel.

Отримані експериментальні результати. Існує взаємозв'язок між високою антиоксидантною активністю екстракту та його відновлювальною здатністю під час синтезу наночастинок (НЧ). У низці досліджень [5, 8–10] встановлено позитивну кореляцію між загальним вмістом фенольних сполук, вмістом флавоноїдів та ефективністю «зеленого» синтезу наночастинок [1–5, 7, 8–10]. Екстракти з вищою антиоксидантною активністю за методами DPPH ((2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил)), ABTS (2,2'-азино-біс (3-етилбензотіазолін-6-сульфонова кислота), FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), як правило, забезпечують утворення менших за розміром, стабільніших наночастинок із кращим ступенем диспергування. Дослідження із використанням рослинних екстрактів показали, що екстракти з вищим вмістом флавоноїдів (визначеним у мг КЕ/г або мг КЕ/л) демонструють сильнішу відновну здатність, що зумовлює швидший перебіг реакції та більш однорідне формування наночастинок золота (Au НЧ).

Тому, було досліджено ефективність відібраних складів НЕР на кількісні значення екстракції флавоноїдів та значення антиоксидантної активності. Також було проведено дослідження з метою оптимізації процесів екстракції (часу екстракції досліджуваної сировини). У дослідженні було розглянуто, як час екстракції впливають на концентрацію екстрагованих флавоноїдів, а також на антиоксидантну активність (рис. 2).

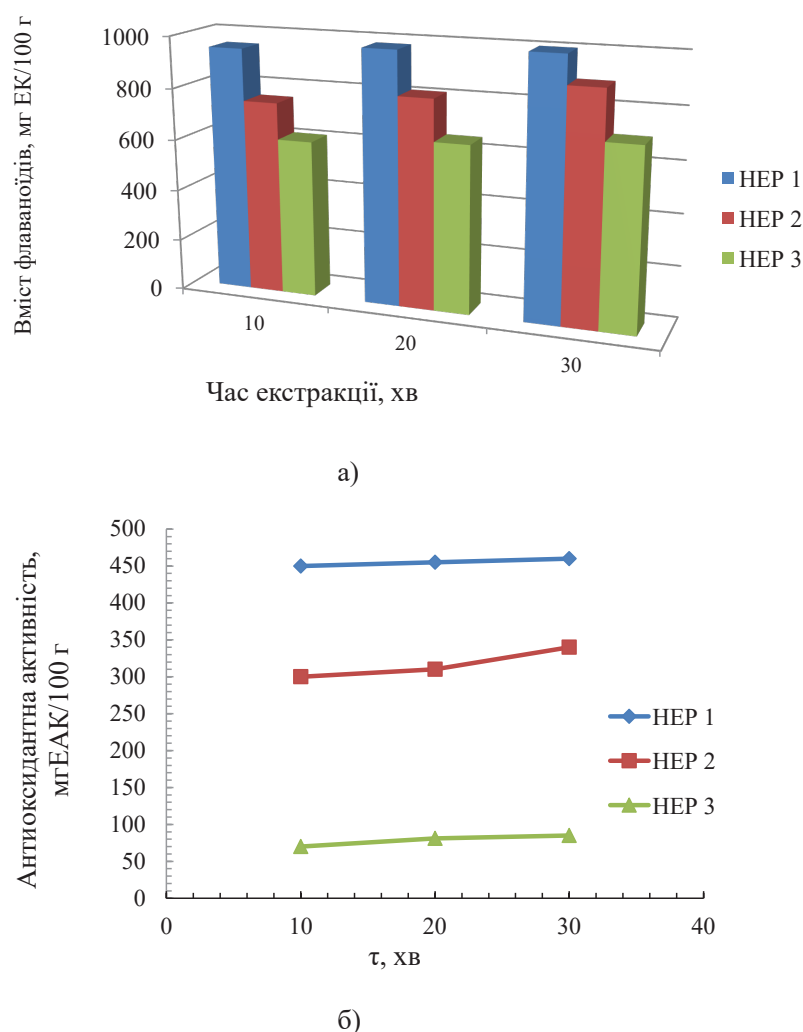


Рис. 2. Вміст флавоноїдів в екстрагованих НЕР (а) та антиоксидантна активність (б) екстрактів шкірки банану (*Musaceae*) залежно від часу екстракції та складу НЕР

Аналіз одержаних даних свідчить, що всі досліджувані складі НЕР є ефективними для екстрагування фенольних сполук. Відтак, після 10–30 хв ультразвукової екстракції загальний кількісний показник становить на рівні 600–1000 мг ЕК/100 г із зниженням в ряду: НЕР1 > НЕР 2 > НЕР 3.

Цілком закономірним є збільшення ступеня екстракції фенольних сполук при збільшенні тривалості екстракції від 10 до 30 хв, оскільки за довшого часу екстракції зростає контакт між розчинником (НЕР) та рослинною сировиною, що сприяє глибшому проникненню розчинника в клітинні структури та вивільненню більших кількостей біоактивних речовин. Крім того, триваліша дія ультразвуку покращує руйнування клітинних стінок, що також підсилює масоперенос і сприяє вищому виходу екстрагованих фенолів.

Аналіз даних визначеної антиоксидантної активності (рис. 2 б) корелює із вмістом фенольних сполук і зберігається її зниження в ряду: НЕР1 (50 мгЕАК/100 г) > НЕР 2 (300–340 мгЕАК/100 г) > НЕР 3 (450–460 мгЕАК/100 г). Антиоксидантна активність екстракту бананової шкірки в середовищі НЕР 3 холін хлорид : сечовина є найнижчою (приблизно вдвічі нижчою, ніж у середовищах холін хлорид : ксилітол та холін-хлорид : пролін) вірогідно пов'язана з його нижчою здатністю до екстрагування фенольних сполук, відсутністю власного антиоксидантного ефекту та меншою ефективністю проникнення в клітини рослинної тканини. Високі показники екстрактивної активності флавоноїдів складу НЕР 1 (холін хлорид : ксилітол) вірогідно, зумовлені рядом факторів: численними гідроксильними групами ксилітолу,

потужною водневою зв'язувальною здатністю суміші, оптимальною полярністю для фенолів, а також збалансованою в'язкістю, що покращує контакт розчинника з твердим матеріалом.

Щоб показати перевагу екстракції із використанням НЕР з точки зору сталого розвитку та екологічності, цей метод було порівняно з традиційним екстрагуванням при використанні водно-етанольного розчинника і проаналізовані за допомогою програмного забезпечення AGREE (Analytical GREEnEss calculator) [13]. Це програмне забезпечення дозволяє нам оцінювати, від 0 до 1, екологічність аналітичних процедур, враховуючи 12 принципів зеленої аналітичної хімії. Як видно з рисунка 3, екстракція за допомогою НЕР досягає кращого загального балу за екологічністю, що показує, що цей метод є більш екологічним та безпечним для здоров'я людини та екосистеми, ніж той, що використовує звичайні гідроорганічні розчинники.

Ефективність отриманих екстрактів на основі НЕР для синтезу та стабілізації наночастинок золота досліджували шляхом відновлення прекурсора наночастинок золота різної початкової концентрації без додавання додаткових реагентів відновників/стабілізаторів.

З одержаних спектрів видно, що в досліджуваному діапазоні початкових концентрацій (0,3–3,0 ммоль/л) розчинів прекурсору та часовому інтервалі синтезу результатом є формування наносистем, а саме наночастинок золота. Характерною ознакою наночастинок золота, є наявність вираженого одного максимуму

поглинання на лінії ППР ($\lambda_{\text{макс}}$) в діапазоні $\lambda = 520\text{--}580$ нм. Відповідно до загальновідомих положень [5–10], максимум в цьому діапазоні відповідає НЧ золота сферичної форми. Одночасно якісним підтвердженням одержання наночастинок золота в розчинах є забарвлення розчинів у рожево-фіолетові кольори різної інтенсивності, що свідчить про утворення колоїдів золота.

Одержані спекти синтезованих дисперсій золота (рис. 4) показують, що досліджувані екстракти, одержані на основі НЕР 1 та НЕР 1 відновлюють іони золота та утворюють наночастинки золота, з формуванням характерних піків при $\lambda = 550\text{--}570$ нм протягом досліджуваного періоду синтезу 10–60 хв. За взаємозв'язком між оптичними властивостями наночастинок золота (смуги ЛППР), поверхневими характеристиками та розподілом НЧ за розмірами експериментально визначено основні закономірності формування НЧ та їх характеристики.

Встановлено, що закономірним є збільшення поглинання з 0,2–0,5 від. од. до 1,8–2,0 при збільшенні вихідної концентрації іонів золота з 0,3 ммоль/л до 3,0 ммоль/л, і у всіх випадках екстракт складу НЕР 1 є більш ефективним у порівнянні з НЕР 1. При використанні екстрактів на основі НЕР 1, 2 середній розмір НЧ в дисперсії оцінений по значенню положення піку $\lambda_{\text{макс}}$ ЛППР спектрів (рис. 4) становить ~55–60 нм. Проте, додатковий аналіз одержаних дисперсій методом скануючої мікроскопії (СЕМ) (рис. 5) з додатковим розподіленням за



Рис. 3. Діаграми, отримані за допомогою AGREE:

(а) екстракція із використанням НЕР та (б) екстракція при використанні етанолу/води.

Ідентифікація номерів: 1 – уникнення обробки зразків; 2 – мінімальний розмір зразка;

3 – вимірювання *in situ*; 4 – збереження реагентів; 5 – автоматизовані та мініатюризовані методи;

6 – уникнення дериватизації; 7 – уникнення відходів; 8 – багатоаналітичні методи; 9 – мінімізація енергії;

10 – реагенти з відновлюваних джерел; 11 – усунення токсичних реагентів; 12 – безпека оператора

розміром свідчить про нижчий розмір утворених наночастинок в дисперсії $d_{cp} = 25\text{--}31$ нм. Встановлено, що одержані системи НЧЗ стабільні та не схильні до агрегації. Відтак ζ – потенціал становить $-28,0$ та $-36,8$ мВ, відповідно.

Висновки. Для синтезу стабільних дисперсій наночастинок золота успішно застосовано екстракти, отримані за допомогою низькотемпературних евтектичних розчинників на основі холін

хлориду. Низькотемпературні евтектичні розчинники з композиціями холін хлорид:ксилітол, холін хлорид:пролін та холін хлорид : сечовина ефективно використовувалися для ультразвукової екстракції активних речовин із бананової шкірки, замінюючи традиційні розчинники. Вміст флавоноїдів у отриманих екстрактах становив від 70 до 460 мг еквіваленту катехіну на 100 г сировини, залежно від складу розчинника.

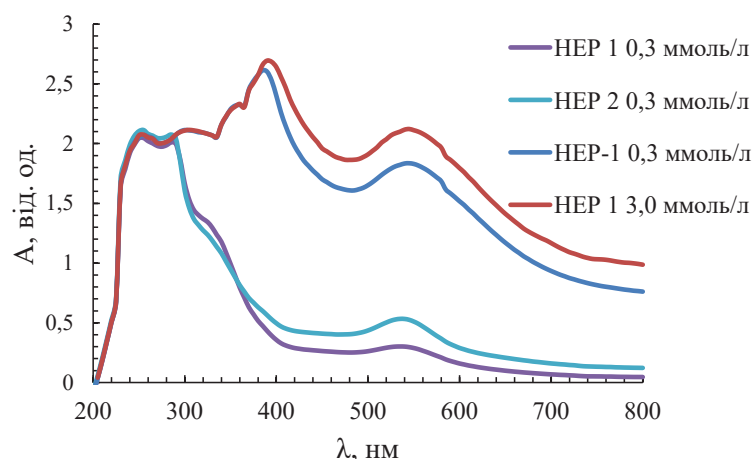


Рис. 4. Спектри наночастинок золота, одержаних із застосуванням екстрактів шкірки банану, отриманих у середовищі глибоких евтектичних розчинників різних складів (HEP 1: Холін хлорид : ксилітол, HEP 2: Холін-хлорид : пролін) при різних початкових концентраціях Au^{3+} ммоль/л

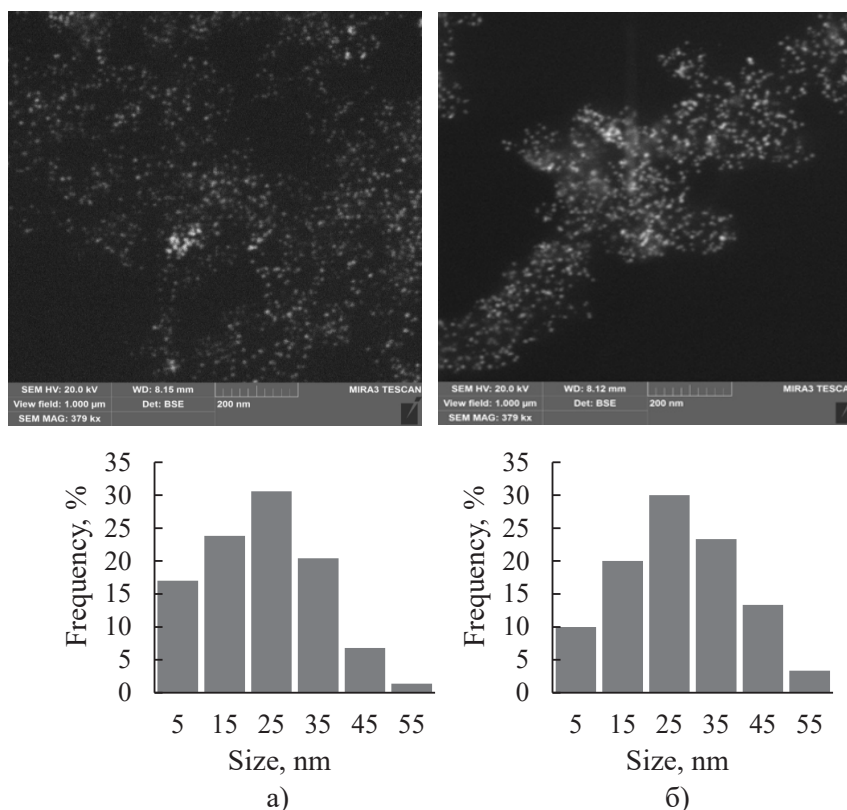


Рис. 5. Зображення скануючої мікроскопії та діаграми розподілення наночастинок за розміром, синтезовані із застосуванням екстрактів шкірки банану, отриманих у середовищі глибоких евтектичних розчинників (HEP 1: холін хлорид : ксилітол (а), HEP 2: холін-хлорид : пролін (б))

Використання цих екстрактів дозволило синтезувати сферичні наночастинки золота з максимальним піком плазмонного резонансного поглинання у діапазоні 550–565 нм, інтенсивність якого зростала при підвищенні концентрації іонів золота від 0,3 до 3,0 ммоль/л. При використанні екстрактів на основі НЕР 1, 2 середній розмір НЧ в дисперсії оцінений по значенню положення піку $\lambda_{\text{макс}}^{\text{ЛППР}}$ спектрів становить ~55–60 нм,

за результатами методу СЕМ з розподіленням за розміром $d_{\text{cp}} = 25\text{--}31$ нм. Стабільність одержаних дисперсій підтверджена визначеним значенням дзета-потенціалу і становить –33 до –36 мВ, що залежало від типу НЕР. Отже, застосування низькотемпературних евтектичних розчинників на основі холін хлориду є перспективним екологічно чистим підходом для отримання стабільних наночастинок золота із рослинних відходів.

Список літератури:

1. Duman H., Akdaşçı E., Eker F., Bechelany M., Karav S. Gold nanoparticles: Multifunctional properties, synthesis, and future prospects. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14 (22). P. 1805. <https://doi.org/10.3390/nano14221805>
2. Gómez-Urios C., Viñas-Ospino A., Puchades-Colera P., Blesa J., López-Malo D., Frígola A., Esteve M.J. Choline chloride-based natural deep eutectic solvents for the extraction and stability of phenolic compounds, ascorbic acid, and antioxidant capacity from *Citrus sinensis* peel. *LWT – Food Science and Technology*. 2023. Vol. 177. P. 114595. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114595>
3. de Almeida Pontes P.V., Shiwaku I.A., Maximo G.J., Batista E.A.C. Choline chloride-based deep eutectic solvents as potential solvent for extraction of phenolic compounds from olive leaves: Extraction optimization and solvent characterization. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 352. P. 129346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129346>
4. Palos-Hernández A., Gutiérrez Fernández M.Y., Escuadra Burrieza J., Pérez-Iglesias J.L., González-Paramás A.M. Obtaining green extracts rich in phenolic compounds from underexploited food by-products using natural deep eutectic solvents: Opportunities and challenges. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022. Vol. 29. P. 100773. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100773>
5. Antunes Filho S., Dos Santos M.S., Dos Santos O.A.L., Backx B.P., Soran M.L., Opreș O., Lung I., Stegarescu A., Bououdina M. Biosynthesis of nanoparticles using plant extracts and essential oils. *Molecules*. 2023. Vol. 28 (7). P. 3060. <https://doi.org/10.3390/molecules28073060>
6. Santhosh P.B., Genova J., Chamati H. Green synthesis of gold nanoparticles: An eco-friendly approach. *Chemistry*. 2022. Vol. 4 (2). P. 345–369. <https://doi.org/10.3390/chemistry4020026>
7. Długosz O., Matyjasik W., Matysik J., Banach M. Anhydrous metal nanoparticle suspensions using deep eutectic solvents (DES) – green approach to metal nanoparticles production. *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 396. 123966. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123966>
8. Datta S., Mahin J., Liberti E., Manasi I., Edler K.J., Torrente-Murciano L. Role of the deep eutectic solvent reline in the synthesis of gold nanoparticles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Vol. 11 (28). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c07337>
9. Ortega-Córdova R., Sánchez-Carillo K., Carrasco-Saavedra S., Ramírez-García G., Pérez-García M.G., Soltero-Martínez J.F.A., Mota-Morales J.D. Polyvinylpyrrolidone-mediated synthesis of ultra-stable gold nanoparticles in a nonaqueous choline chloride–urea deep eutectic solvent. *RSC Appl. Interfaces*. 2024. Vol. 1. P. 600–611.
10. Воробйова В.І., Андрух Ю.М., Морозова Д.О., Зємцова В.В., Васильєв Г.С., Скиба М.І., Скиба Ю.М. Добір складових для синтезу екологічних іонних рідин нового покоління на основі квантово-хімічних розрахунків. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74), № 1. С. 78–84. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_2/16.pdf
11. Zou F., Tan C., Zhang B., Wu W., Shang N. The valorization of banana by-products: Nutritional composition, bioactivities, applications, and future development. *Foods*. 2022. Vol. 11 (20). P. 3170. <https://doi.org/10.3390/foods11203170>
12. Chaudhry F., Ahmad M. L., Hayat Z., Ranjha M. M. A. N., Chaudhry K., Elboughdiri N., Asmari M., Uddin J. Extraction and evaluation of the antimicrobial activity of polyphenols from banana peels employing different extraction techniques. *Separations*. 2022. Vol. 9 (7). P. 165. <https://doi.org/10.3390/separations9070165>
13. Pena-Pereira F., Wojnowski W., Tobiszewski M. AGREE-Analytical GREENness Metric Approach and Software. *Anal. Chem*. 2020. Vol. 92. P. 10076–10082. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887>

Skyba Yu.M., Skyba M.I., Kovalenko I.L. SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING EXTRACTS OBTAINED IN DEEP EUTETIC SOLVENT ENVIRONMENTS

The article studies the effectiveness of using extracts obtained in deep eutectic solvents (DES) based on choline chloride for the synthesis of stable dispersions of gold nanoparticles. DES s based on choline chloride were used as a new alternative to traditional solvents for ultrasonic extraction of substances from plant materials, in particular, on the example of banana peel (Musaceae). The method of theoretical calculations using the Analytical GREENness calculator was used to compare extraction using DES s and traditional extraction with ethanol/water. Gold nanoparticles were synthesized by reducing an aqueous solution of hydrogen tetrachloroaurate (III) hydrate ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) using the obtained DES extracts of three types: choline chloride: xylitol, choline chloride: proline, choline chloride: urea. It was found that the content of extracted flavonoids, using the studied DES compositions based on choline chloride, is 70–460 mg EC/100 g and depends on the DES composition. The determined value of the antioxidant activity of the obtained extracts was by the DPPH method ((2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)) was DES -1 (50 mgEAA/100 g) > DES -2 (300–340 mgEAA/100 g) > DES -3 (450–460 mgEAA/100 g). It was found that banana peel extracts obtained in the studied DES media allow the synthesis of spherical gold nanoparticles (Au NPs). The obtained nanoparticles are characterized by a maximum peak of plasmon resonance absorption approximately at $\lambda = 550\text{--}565\text{ nm}$ with $A = 0.2\text{--}0.5\text{ ud. units.}$ to 1.8–2.0 with an increase in the initial concentration of gold ions from 0.3 mmol/l to 3.0 mmol/l. It was established that the technologically appropriate synthesis parameters are: the ratio of the precursor solution to the DES extract 1:10 (vol/vol), $\tau = 30\text{--}60\text{ min}$ at a temperature of 50–60 °C. By the method of dynamic light scattering, it was established that the average size range of nanoparticles is 50–61 nm. It was established that the dispersions obtained in the DES medium are stable to aggregation, as evidenced by the value of the zeta potential $\zeta = -33 \div -36\text{ mV}$.

Key words: metal nanoparticles, characteristics, optical properties, stability, synthesis, deep eutectic solvents, extracts.