

**Скиба М.І.**

Український державний університет науки та технологій

**Коваленко І.Л.**

Український державний університет науки та технологій

**Скиба Ю.М.**

Український державний університет науки та технологій

**Куниця Д.В.**

Український державний університет науки та технологій

**Купрін М.О.**

Український державний університет науки та технологій

**Воробйова В.І.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЛАЗМОХІМІЧНО ОДЕРЖАНИХ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИБУХОВИХ НІТРОАРОМАТИЧНИХ РЕЧОВИН

У статті здійснено дослідження щодо розробки колориметричного зонду на основі функціоналізованих плазмохімічно одержаних наночастинок золота (Au НЧ) для визначення вибухових нітроароматичних речовин. Наночастинки золота були синтезовані плазмохімічним способом з водного розчину прекурсору із використанням традиційного стабілізатора наночастинок (цитрату натрію) з послідовною модифікацією їх поверхні – амінотеолом (тетраметилтіурам дисульфідом). Досліджено та визначено технологічно доцільні умови модифікації поверхні НЧ амінотеолом – тетраметилтіурам дисульфідом, а саме: значення рН середовища, тривалість модифікації НЧ, концентрація тетраметилтіурам дисульфиду тощо). Визначено спектральні характеристики поглинання в УФ-видимому діапазоні, розподілення за розміром та значення дзета потенціалу функціоналізованих наночастинок золота. Встановлено, що після модифікації НЧ золота є стабільними дисперсіями із значенням дзета-потенціалу  $-25 \div -30$  мВ, розміром 28–35 нм. Досліджено сенсорні властивості функціоналізованих дисперсій для кількісного колориметричного визначення нітроароматичних речовин (2,4,6-тринітротолуол (тротил)) в водних середовищах. За визначених оптимальних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання розчину функціоналізованих НЧ з аналітом при  $\lambda = 520/610$  нм показало лінійну залежність від концентрації тринітротолуолу в діапазоні концентрації 0,02–0,1 мг/л ( $R^2 = 0,98$ ). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення із використанням функціоналізованих наночастинок базується на їх агрегації внаслідок донорно-акцепторної взаємодії між аміногрупами тіраму та нітрогрупами тротилу з характерним зсувом поверхневого плазмонного резонансу наночастинок золота в довгохвильову зону. Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення тринітротолуолу із використанням наночастинок: межа виявлення ( $LOD = 5$  мкг/л).

**Ключові слова:** нанозолото, модифікація, тетраметилтіурам дисульфиду, сенсор, 2,4,6-тринітротолуол, колориметрія, агрегація.

**Постановка проблеми.** Представником групи нітроароматичних вибухових речовин, що широко використовується в промисловості та гірничодобувній промисловості [1], і особливо у військовій сфері є 2,4,6-тринітротолуол (тротил) [2]. Тро-

тил є токсичною речовиною і може викликати подразнення при контакті зі шкірою [3]. У людей, які протягом тривалого часу піддавалися впливу тротилу, спостерігалися анемія та порушення функції печінки [4]. Проте післявибухові залишки

в місцях бойових дій забруднюють ґрунт, живі істоти, які харчуються ґрунтом, і підземні води [5]. Агентство з охорони навколишнього середовища США класифікувало тротил як небезпечні відходи, оскільки він є потенційно канцерогенним і мутагенним [6]. Через сильну вибухову властивість тротилу та шкоду, яку він завдає навколишньому середовищу та людям, його виявлення привернуло великий інтерес в останні роки, і були розроблені нові методи підвищення чутливості та вибірковості [7].

На сьогоднішній день для виявлення тротилу відомо значну кількість підходів, серед яких основними є рідинна хромато-мас-спектрометрія [2], газова хромато-мас-спектрометрія [3], високоефективна рідинна хроматографія [5-7] реакційно-мас-спектрометрія з переносом протонів, поверхнево-посилене комбінаційне розсіяння [5, 7] та електрохімічні методи [8]. Засоби визначення нітроароматичних вибухових речовин, а саме інструментальні методи мають недоліки, основними серед яких є те, що вони потребують спеціальної підготовки проб, займають багато часу, потребують добре навченого персоналу, складного та дорогого обладнання.

Тому наразі, для потреби виявлення та контролю за полютантами даної категорії, що утворюються в результаті вибуху та продуктів їх перетворення в навколишньому середовищі, актуальним питанням є розробка високочутливих складових аналітичних тест-систем та сенсорів (аналізаторів) різного спрямування та методик саме оперативного, селективного та чутливого їх визначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові роботи закордонних [1-4] та вітчизняних [5-7] фахівців щодо розробки матеріалів та методів оперативного визначення свідчать, що особливо перспективними є скринінгові системи різного складу із застосуванням наноматеріалів. В роботах закордонних авторів [8, 9] зазначається, про виключну ефективність застосування колориметричних зондів із застосуванням металічних наночастинок Ag, Au конфігурацій (моночастинки та ядро/оболонка, сплав) [10, 11] з різними типами стабілізаторів, тест-систем [12] на основі наноматеріалів завдяки перевагам простоти синтезу, біосумісності, розширеної поверхневої функціоналізації та регульованих фізико-хімічних властивостей, на додаток до локалізованого поверхневого плазмового резонансу. У більшості даних наявних в літературі [5-12], при колориметричному виявленні аналізів, зокрема (нітроароматичних вибухових речовин) наночастинок, зокрема наночастинок золота, змі-

нюють свій колір залежно від їхнього агрегатного стану та взаємодії з аналітом. У всіх публікаціях, одним із найважливіших складових розробки сенсора та дослідження його властивостей є кон'югація наночастинок із аналітом. Це процес, під час якого наночастинки функціоналізуються (модифікуються) специфічними молекулами або лігандами, які можуть вибірково зв'язуватися з цільовим аналітом. Тобто основними складовими процесу є по-перше, функціоналізація наночастинок (наночастинки покривають молекулами, які мають хімічні групи, здатні специфічно зв'язуватися з аналітом; друге – взаємодія з аналітом; третє – зміна оптичних властивостей (зв'язування аналіту змінює оптичні властивості наночастинок, такі як поверхневий плазмонний резонанс, що, у випадку колориметричного виявлення, призводить до видимої зміни кольору).

Тому, саме підбір сполуки-функціоналізатора та дослідження його ефективності, на ряду з визначенням впливу параметрів функціоналізатора (концентрація, об'єм тощо) і наночастинок (розмір, дисперсність тощо), є ключовими факторами при розробці сенсорних системах, зокрема у колориметричному виявленні.

Для визначення тротилу в літературних джерелах описані ефективні колориметричні датчики, у яких AuНЧ були модифіковані цистеїном [10-12] або цистеаміном. Ці модифікатори містять тіолові (-SH) та амініні (-NH<sub>2</sub>) групи. Використовуючи датчик AuНЧ, з цистеїном (Au/Цистеамін), було отримано лінійну калібрувальну криву в концентраційному діапазоні  $4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-10}$  М тротилу, яка логарифмічно корелювала з концентрацією аналіту. Однак записані спектри поглинання в цьому концентраційному діапазоні демонстрували залежність від концентрації.

Тетраметилтіурам дисульфід (тірам) як модифікатор AuНЧ потенційно є дешевшим за інші амінотіоли для виготовлення зондів, але може конкурувати з ними щодо селективності та чутливості аналізу нітровибухових речовин. Тетраметилтіурам дисульфід, більш відомий як тірам, є окисленою формою диметилдитіокарбамату. Він використовується як сільськогосподарський фунгіцид для захисту врожаю від хвороб та псування під час зберігання або транспортування. Тірам широко застосовується на фруктових, овочевих, декоративних рослинах, а також трав'янистих культурах, забезпечуючи захист насіння.

**Постановка завдання.** Тому метою роботи було здійснити дослідження щодо функціоналізації плазмохімічно одержаних наночастинок

золота та їх використання для колориметричного визначення вибухових нітроароматичних речовин (тротилу).

**Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень.** Одержання стабілізованих колоїдних розчинів наночастинок золота НЧ здійснювали шляхом обробки суміші попередньо одержаних водних розчинів прекурсорів  $[Au^{3+}]$  ( $0,1$  ммоль/л) із солі тетрахлоораурату водню  $HAuCl_4$  та реагенту-стабілізатору [СТАБ] = цитрату натрію при мольному співвідношенні  $[Me]:[СТАБ] = 1$  розрядом плазми, що формується в реакторі. Параметри формування плазмового розряду: сила струму  $I = 120$  мА і  $P = 0,8$  МПа. Концентрація  $Au^{3+}$ . Загальний об'єм розчину  $V = 40$  мл.

До розчину наночастинок золота (Au НЧ) додавали модифікуючий агент тетраметилтіурамдисульфід (тірам,  $2,0$  мл,  $1,0 \times 10^{-5}$  М) (Au-наночастинки агрегують при всіх концентраціях тіраму вище  $1,0 \times 10^{-5}$  М), після чого суміш перемішували при кімнатній температурі протягом  $15$  годин. Після закінчення цього часу розчин модифікованих наночастинок золота розподіляли в центрифужні пробірки по  $5,0$  мл кожна і центрифугували при  $10\ 000$  об/хв протягом  $30$  хвилин. Супернатант видаляли, а осад промивали водою ( $200,0$  мкл) і збирали в одну колбу об'ємом  $10,0$  мл, після чого розбавляли до  $10,0$  мл водою. Отриманий розчин наночастинок золота, модифікованих тірамом (Au НЧ/Тірам), використовували для визначення тротилу. Поглинання одержаних дисперсій залежно від умов синтезу реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-Vis UV-5800PC з використанням кварцових кювет.

Дослідження колориметричної активності одержаних нанодисперсій здійснювали відповідно до наступної методики. Змішували  $0,2$  мл диспергованого розчину AuНЧ/Тірам та  $0,01$  мл ацетатний буфер амонію (рН  $7,0$  ( $1,0 \times 10^{-1}$  М)). До отриманої суміші додавали різні концентрації розчину тринітротолуол в ацетонітрилі ( $0,02$ – $0,12$  мг/л). Після цього суміш розбавляли ацетонітрилом до об'єму  $1,0$  мл. УФ-спектри поглинання реєстрували в діапазоні  $400$ – $800$  нм.

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

$$A' = (A_{610}/A_{520})_s - (A_{610}/A_{520})_k \quad (1)$$

При наведеному вище методі розрахунку значення абсорбції зразок не залежав від кількості наночастинок, а калібрувальне рівняння було отримано з корегованим значенням поглинання

( $A'_{610/520}$ ). Значення межі виявлення (LOD) розраховували на основі параметрів градууювальної прямої ( $S_a$  – стандартне відхилення вільного члена та  $b$  – тангенса нахилу) відповідно до рівнянь (2):

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

Отримані експериментальні результати.

У молекулі тіраму (тетраметилтіурамдисульфід) присутні два зв'язки: дисульфідний зв'язок (S–S) з'єднує дві молекули тіокарбаматної групи, а моносульфідний зв'язок (C=S) є частиною цих груп. Тому слід було очікувати, що при функціоналізації наночастинок золота тірамом його сірчані групи можуть ковалентно зв'язуватися з поверхнею золота, утворюючи стабілізаційне покриття. В результаті такої функціоналізації, у модифікованих тірамом НЧ третинні аміногрупи тіраму залишаються вільними на поверхні НЧ і доступними для подальшої взаємодії з аналітами.

Відомо, що модифікатор, який використовується у високій концентрації або у великих об'ємах при тій самій концентрації, може безпосередньо агрегувати дисперсії Au НЧ без додавання аналіту. Тому першочергово було досліджено доцільні параметри функціоналізації дисперсій НЧ тірамом: концентрація, об'єм тіраму та тривалість модифікування. Результати наведено в табл. 1.

Для оптимізації концентрації та об'єму модифікатора тіраму було досліджено модифікування протягом  $15$  годин, використовуючи різні концентрації тіраму (від  $1,0 \times 10^{-6}$  до  $1,0 \times 10^{-3}$  М). Виявлено, що при концентраціях тіраму вище  $1,0 \times 10^{-5}$  М наночастинки золота агрегують (табл. 1). Також наночастинки модифікували, додаючи різні об'єми тіраму (від  $1,0$  до  $4,0$  мл) при концентрації  $1,0 \times 10^{-5}$  М. Було визначено, що оптимальний об'єм модифікатора становить  $2,0$  мл (табл. 1).

На рис. 1 наведено спектри, СЕМ-зображення та розподілення за розміром плазмохімічно одержаних та функціоналізованих за оптимальних умов тірамом плазмохімічно одержаних колоїдних розчинів НЧ Au. Видно, що функціоналізовані за оптимальних умов тірамом наночастинки характеризуються однаковим плазмонним резонансом НЧ Au в УФ-частині видимого спектру (близько  $\lambda = 520$ – $530$  нм), що характерний НЧ з розміром  $20$ – $30$  нм.

Для досягнення оптимального аналітичного сигналу від взаємодії AuНЧ/Тірам з аналізом тротилом було вивчено вплив рН середовища на колориметричне виявлення. Використовувався трис-НСІ буфер у різних рН-діапазонах (від  $6,0$  до  $8,0$ ). Дослідження показало, що найкращий сигнал при взаємодії тротилу з AuНЧ/Тірам фор-

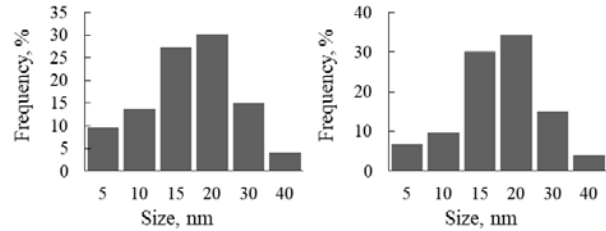
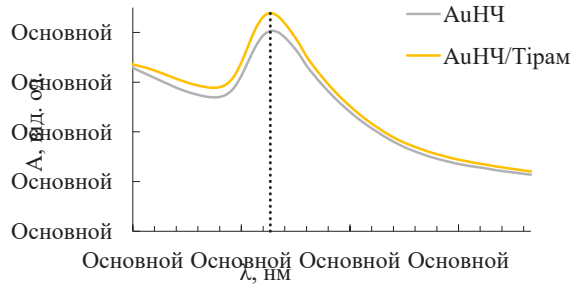
Таблиця 1  
**Оптимізація функціоналізації плазмохімічно одержаних наночастинок золота тірамом**

Концентрація тіраму, М	Виявлення агрегації наночастинок УФ-спектри	
$1,0 \times 10^{-6}$ М	–	
$1,0 \times 10^{-5}$ М	–	
$1,0 \times 10^{-4}$ М	+	
$1,0 \times 10^{-3}$ М	+	
Об'єм тіраму (при $1,0 \times 10^{-5}$ М)	Виявлення агрегації наночастинок	
1,0 мл	–	
2,0 мл	–	
3,0 мл	+	
4,0 мл	+	

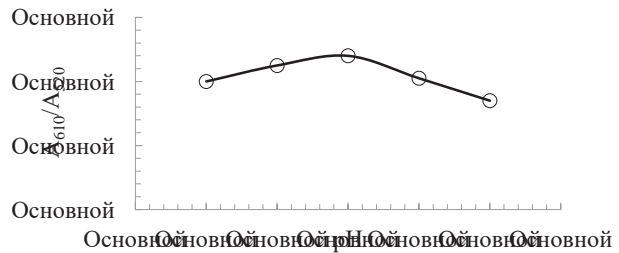
мується при рН 7. На графіку представлено відношення поглинання ( $A_{610}/A_{520}$ ) розчинів AuНЧ/Тірам у присутності тротилу залежності від рН середовища. Найвищі показники відношення поглинання досягнуті при рН 7, що вказує на оптимальні умови для взаємодії між AuНЧ/Тірам та аналітами (тротилом).

Було досліджено колориметричні характеристики функціоналізованих дисперсій AuНЧ/Тірам. УФ-видові спектри зонда були зафіксовані в присутності різних концентрацій тротилу за оптимальних умов. УФ-спектри поглинання розчинів зонда AuНЧ/Тірам у присутності тротилу показали появу нової смуги в діапазоні 600–800 нм, яка виникає внаслідок агрегації наночастинок, поряд з характерною смугою ППР для наночастинок золота, що спостерігався при  $\lambda=520$  нм. Проте в новій смузі, сформованій внаслідок агрегації, не спостерігається чіткий пік. Замість цього відзначається плавне збільшення довжини хвилі (610 нм для тротилу та 650 нм для тетриллу).

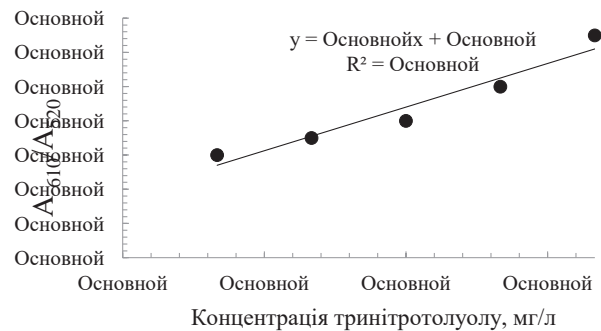
Як показано на рис. 3, поглинання розчину AuНЧ/Тірам при 610 нм у присутності амоній-ацетатного буфера (рН 7,0) поступово зростало зі збільшенням концентрації тротилу в діапазоні від 0,0 до 0,15 мг/л. Для отримання надійного лінійного співвідношення в концентраційному діапазоні від 0,02 до 0,10 мг/л було побудовано графік скоригованої абсорбції ( $A'_{610/520}$ ) в залежності



**Рис. 1. Спектри, СЕМ-зображення та розподілення за розміром плазмохімічно одержаних Au та функціоналізованих тірамом за оптимальних умов**



**Рис. 2. Вплив рН середовища при колориметричному визначенні тринітротолуолу**



**Рис. 3. Колориметричне визначення тротилу із використанням наночастинок золота – лінійна калібрувальна крива коефіцієнта поглинання AuНЧ/Тірам зі збільшенням концентрації тринітротолуолу**

від концентрації тротилу, який показав високий коефіцієнт кореляції, рівний 0,9968.

В табл. 2 наведені основні валідаційні характеристики кількісного визначення тротилу: 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  
Аналітичні характеристики Au НЧ  
як сенсора для тринітротолуолу

Зразок НЧ золота	Аналіт	Лінійний діапазон, мг/л	Значення межі виявлення LOD, мкмоль/л	Коефіцієнт варіації, у відсотках (N = 5)
Au/Тірам	Тротил	5,0–25,0	5,81	0,98

**Висновки.** У цій статті досліджено розробку колориметричного зонда на основі плазмохімічно синтезованих наночастинок золота (Au НЧ) для виявлення вибухових нітроароматичних сполук. Наночастинок золота синтезували за допомогою плазмохімічної методики з використанням традиційного стабілізатора – цитрату натрію. Далі

поверхня наночастинок була функціоналізована тетраметилтіурам дисульфідом (амінотеолом). Було досліджено умови модифікації поверхні, такі як рН, тривалість процесу та концентрація тетраметилтіурам дисульфиду, щоб визначити оптимальні параметри для стабільності дисперсій. Визначено спектральні характеристики в УФ-видимому діапазоні, розмір частинок та дзета-потенціал. Функціоналізовані наночастинок показали стабільність із дзета-потенціалом в межах від  $-25$  до  $-30$  мВ і розмірами частинок  $28-35$  нм. Було також досліджено чутливість зонда до виявлення нітроароматичних сполук у воді. За оптимальних умов, УФ-видимі спектри при  $\lambda=520/610$  нм демонстрували лінійну залежність поглинання від концентрації тринітротолуолу (ТНТ) у діапазоні  $0,02-0,1$  мг/л ( $R^2 = 0,98$ ). Встановлено, що межа виявлення тринітротолуолу складає  $5$  мкг/л.

#### Список літератури:

- Zhao X., Yinon J., Fanning K. Characterization and origin identification of 2,4,6-trinitrotoluene through its by-product isomers by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2002. 975. P. 197–205. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)01145-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)01145-8)
- Bai X., Zhang, W. Zhang, L., Zhang X. Surface plasmon resonance-enhanced photothermal nanosensor for sensitive and selective visual detection of 2,4,6-trinitrotoluene. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. 228. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.01.074>.
- Eisner L., Wilhelm I., Flachenecker G., Hürttlen J., Schade W. Molecularly imprinted sol-gel for TNT detection with optical micro-ring resonator sensor chips. *Sensors*. 2019. 19 (19). P. 3909. <https://doi.org/10.3390/s19183909>
- Erçağ E., Üzer A., Apak R. Selective spectrophotometric determination of TNT using a dicyclohexylamine-based colorimetric sensor. *Talanta*. 2009. 78(3). P. 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.12.042>
- Dasary S. S. R., Singh A. K., Senapati D., Yu H., Ray P. C. Gold nanoparticle based label-free SERS probe for ultrasensitive and selective detection of trinitrotoluene. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131. P. 13806–13812. <https://doi.org/10.1021/ja906086c>
- Ilyas Q., Waseem M. T., Junaid H. M., Khan Z. A., Munir F., Jabbar Shaikh A., Shahzad S. A. Fluorescein based fluorescent and colorimetric sensors for sensitive detection of TNP explosive in aqueous medium: Application of logic gate. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. 272. 120994. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.120994>.
- Oskoei Y. M., Fattahi H., Hassanzadeh J., Azar A. M. Selective determination of trinitrotoluene based on energy transfer between carbon dots and gold nanoparticles. *Analytical Sciences*. 2016. 32(2). P. 193–199. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.193>
- Trofimov V. A., Varentsova, S. A. A possible way for the detection and identification of dangerous substances in ternary mixtures using THz pulsed spectroscopy. *Sensors*. 2019. 19 (10). P. 2365. <https://doi.org/10.3390/s19102365>
- Üzer A., Erçağ E., Apak R. (2004). Selective spectrophotometric determination of trinitrotoluene, trinitrophenol, dinitrophenol and mononitrophenol. *Analytica Chimica Acta*, 505 (1). P. 83–93. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00674-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00674-3)
- Rujiralai, T., Leelaharat, N., & Cheewasedtham, W. (2024). Highly specific colorimetric detection based on aggregation of L-cysteine functionalized gold nanoparticles for cypermethrin in water samples. *RSC Advances*. 13. P. 9175–9183. <https://doi.org/10.1039/d3ra07626a>
- Devi S., Singh B., Paul A. K., Tyagi S. Highly sensitive and selective detection of trinitrotoluene using cysteine-capped gold nanoparticles. *Analytical Methods*. 2016. 8 (22). P. 4398–4405. <https://doi.org/10.1039/C6AY01036A>
- Saglam S., Üzer A., Erçağ E., Apak R. Electrochemical determination of TNT, DNT, RDX, and HMX with gold nanoparticles/poly(carbazole-aniline) film-modified glassy carbon sensor electrodes imprinted for molecular recognition of nitroaromatics and nitramines. *Analytical Chemistry*. 90 (12). 2018. P. 7364–7370. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b00715>

13. Idros N., Ho M.Y., Pivnenko M., Qasim M.M., Xu, H., Gu Z., Chu D. Colorimetric-Based Detection of TNT Explosives Using Functionalized Silica Nanoparticles. *Sensors*. 2015. 15. P. 12891–12905. <https://doi.org/10.3390/s150612891>

**Skyba M.I., Kovalenko I.L., Skyba Yu.M., Kuntz D.V., Kuprin M.O., Vorobiova V.I.**  
**FUNCTIONALIZATION OF PLASMACHEMICALLY OBTAINED GOLD NANOPARTICLES FOR THE COLORIMETRIC DETERMINATION OF EXPLOSIVE NITRO-AROMATIC SUBSTANCES**

*The article deals with the development of a colorimetric probe based on functionalized plasma-chemically obtained gold nanoparticles (Au NPs) for the determination of explosive nitroaromatic substances. Gold nanoparticles were synthesized by a plasma-chemical method from an aqueous precursor solution using a traditional nanoparticle stabilizer (sodium citrate) with subsequent modification of their surface – aminothiols (tetramethylthiuram disulfide). The technologically appropriate conditions for modifying the surface of NPs with aminothiols-tetramethylthiuram disulfide were investigated and determined, and the following: the pH value of the medium, the duration of modification of NPs, the concentration of tetramethylthiuram disulfide, etc.). Spectral characteristics of absorption in the UV-visible range, size distribution and zeta potential value of functionalized gold nanoparticles were determined. It was found that after modification, gold NPs are stable dispersions with a zeta potential value of  $-25 \div -30$  mV and a size of 28–35 nm. Sensory properties of functionalized dispersions for quantitative colorimetric determination of nitroaromatic substances (2,4,6-trinitrotoluene (TNT)) in aqueous media were investigated. Under the determined optimal model conditions, the absorption of UV-visible radiation of a solution of functionalized NPs with an analyte at  $\lambda = 520/610$  nm showed a linear dependence on trinitrotoluene concentrations in the concentration range of 0.02–0.1 mg/l ( $R^2 = 0.98$ ). It has been demonstrated that the method of colorimetric determination using functionalized nanoparticles is based on their aggregation as a result of the donor-acceptor interaction between thiram amino groups and nitro groups of TNT with a characteristic shift of the surface plasmon resonance of gold nanoparticles to the long-wavelength zone. The main validation characteristics of the quantitative determination of trinitrotoluene using nanoparticles were established: the limit of detection (LOD = 5  $\mu$ g/l).*

**Key words:** nanogold, modification, tetramethylthiuram disulfide, sensor, 2,4,6-trinitrotoluene, colorimetry, aggregation.