

АНОТАЦІЯ

Корон А. О. Фотостимульований синтез та сенсорні властивості наночастинок срібла. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 102 – Хімія (галузь знань 10 – Природничі науки). – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено встановленню закономірностей фотостимульованого синтезу наночастинок (НЧ) срібла різної морфології у водних розчинах, з'ясуванню ролі енергії фотонів та окисно-відновних властивостей стабілізатора у встановленні кінцевої форми НЧ, а також експериментальному дослідженню і комп'ютерному моделюванню сенсорних властивостей одержаних наноструктур.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, окреслено її зв'язок із науковими програмами та планами кафедри хімії та експертизи харчової продукції, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про публікації, апробацію результатів, особистий внесок здобувача, а також структуру й обсяг дисертації.

У **першому** розділі проаналізовано літературні дані щодо фізичних основ плазмонних властивостей НЧ срібла, методів їх синтезу та принципів сенсорного застосування. Розглянуто природу локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР), теорію Мі для сферичних металевих НЧ, умову виникнення резонансу, показники добротності та рефрактометричної чутливості. Показано, що серед «плазмонних» металів срібло вирізняється

найвищою добротністю ЛППР у широкому спектральному діапазоні (300–1200 нм), а положення і ширина смуги резонансу визначаються не лише природою металу, а й розміром, формою НЧ та діелектричною проникністю середовища. Описано методи синтезу НЧ срібла й окремо розглянуто фотостимульований синтез — пряме фотовідновлення та плазмонно-опосередкований ріст НЧ, а також три можливі фотофізичні механізми впливу збудження ЛППР на хімічні перетворення (фототермічний ефект, концентрування електромагнітного поля поблизу НЧ та генерація «гарячих» електрон-діркових пар). Проаналізовано механізми роботи НЧ срібла як сенсорів та встановлено, що анізотропні форми із загостреними вершинами і ребрами демонструють суттєво вищу чутливість, ніж сферичні НЧ. За результатами літературного огляду виокремлено низку невирішених питань, що визначили напрями подальшого дослідження.

У другому розділі описано реактиви, матеріали та експериментальні методи, використані в роботі. Наведено двостадійну методику фотостимульованого синтезу НЧ срібла, що передбачає одержання сферичних зародків борогідридним відновленням аргентум нітрату та їхнє подальше опромінення монохроматичним світлом у радіальному опромінювачі або штативі зі світлодіодами. Охарактеризовано комплекс методів дослідження: спектрофотометрію, атомно-силову мікроскопію (АСМ), сканувальну (СЕМ) і просвічувальну (ПЕМ) електронну мікроскопію, оптичну мікроскопію темного поля, циклічну вольтамперометрію та кондуктометрію, вимірювання електрокінетичного потенціалу, седиментаційної стійкості розчинів НЧ, а також рефрактометрію розчинів НЧ, диспергованих у середовищах з відмінним від води показником заломлення. Окремо описано розширення інструментарію MNPBEM додаванням декаедричної форми, що дає змогу розраховувати електромагнітні властивості таких НЧ без втрати точності

порівняно з наближеними формами.

У **третьому** розділі наведено результати експериментальних досліджень фотостимульованого синтезу. Встановлено, що опромінення одного і того самого вихідного розчину зародків, стабілізованих натрій цитратом, синім світлом ($\lambda = 450\text{--}462\text{ нм}$) призводить до утворення декаедричних НЧ, а зеленим ($\lambda = 515\text{ нм}$), жовтим ($\lambda = 595\text{ нм}$) та червоним ($\lambda = 633\text{ нм}$) — до утворення призматичних НЧ. Морфологію і розміри утворених НЧ підтверджено за допомогою спектроскопії, СЕМ та АСМ. Показано, що зміна довжини хвилі опромінення лише на 12 нм змінює середній діаметр декаедрів з 34 нм до 50 нм за незмінних інших умов, що свідчить про вирішальну роль енергії фотонів у визначенні морфології НЧ. Одержані золі нанодекаедрів виявили високу седиментаційну стійкість та від'ємний дзета-потенціал (до -190 мВ). Вперше досліджено фотостимульовану агрегацію НЧ, стабілізованих натрій бензоатом, яка відбувається замість морфологічної перебудови і є перспективним методом одержання кластерів металевих частинок і метамолекул. Порівняльним електрохімічним дослідженням цитрат-, бензоат- і саліцилат-йонів встановлено, що важливим параметром, який задає шлях синтезу, є окисно-відновний потенціал стабілізатора. Чим слабший відновник (цитрат), тим довше йони Аргентуму перебувають у розчині, маючи достатньо часу для того, щоб перебудуватися у термодинамічно стабільні форми. Проміжний відновник (бензоат) спричиняє агрегацію, а сильніший (саліцилат) повністю блокує перетворення. Виявлено та кількісно інтерпретовано тимчасовий гіпсохромний зсув ЛППР при розведенні золей (~50 нм для декаедрів і ~100 нм для призм) як десорбцію адсорбованих йонів Аргентуму, що відповідає зростанню концентрації носіїв заряду на ~20 % і ~25 % відповідно. Цей зсув можна використовувати як спектроскопічний показник завершеності синтезу.

У **четвертому** розділі запропоновано термодинамічний підхід до пояснення утворення наночастинок срібла різної форми під час фотостимульованого синтезу. Застосовано модель, що залежить лише від енергії фотона, а не механізму передачі енергії, причому локальне нагрівання враховується через температурну залежність зміни вільної енергії Гіббса ΔG . Побудовано діаграму залежності ΔG від відновного потенціалу реагенту і показано, що кількість енергії, яку фотон вносить у систему, зсуває хімічний потенціал реагентів і визначає, у яку область термодинамічного простору потрапляє система (двовимірного (2D) чи тривимірного (3D) росту). Опромінення червоними та зеленими фотонами зсуває рушійну силу в область 2D-росту, тому спостерігається утворення призм. Натомість опромінення синіми фотонами зсуває рушійну силу в область 3D-росту, тому утворюються декаедри. Запропонована модель є універсальною і не залежить від природи реагентів, що підтверджується перетворенням НЧ різної форми у призми під дією гідроген пероксиду.

У **п'ятому** розділі досліджено сенсорні властивості НЧ срібла. Вперше інтегровано модель декаедричної форми у програмний комплекс MNPBEM (MATLAB). Експериментально визначено рефрактометричну чутливість декаедричних НЧ: 245 нм/ОПЗ у системі вода–гліцерол та 247 нм/ОПЗ у системі вода–сахароза. Одержані значення чутливості та спектри екстинкції загалом узгоджуються зі значеннями, обчисленими методом граничних елементів. Відмінність експериментального значення чутливості від розрахункового може бути пояснена усередненням поглинання полідисперсного ансамблю НЧ порівняно з ідеальною моделлю окремої НЧ, а також екрануванням поверхні щільним подвійним електричним шаром. За розрахунками розподілу електромагнітного поля навколо НЧ встановлено природу плазмонних мод і показано, що максимальне підсилення поля

прогнозується на вершинах і ребрах НЧ. Побудована карта залежності положення максимуму ЛППР від геометричних параметрів НЧ дає змогу прогнозувати спектральне положення резонансу в межах 440–700 нм і підбирати розміри НЧ під потрібну довжину хвилі. Чутливість монотонно зростає зі збільшенням розміру НЧ — від 150 до 550 нм/ОПЗ у водних розчинах. Показано, що більші НЧ з однаковим положенням резонансу мають майже на 60 % вищу чутливість, ніж менші частинки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше запропоновано універсальну термодинамічну модель вибору форми НЧ срібла під час фотостимульованого синтезу, яка залежить лише від енергії фотона і не потребує визначення конкретного механізму передачі енергії від фотона до НЧ. Показано, що енергія фотонів видимого діапазону ($\approx 190\text{--}260$ кДж/моль) співмірна з енергією переходу від плоских (2D) до об'ємних (3D) структур срібла та визначає кінцеву морфологію НЧ;

- вперше встановлено, що важливим параметром, який впливає на перебіг фотостимульованого перетворення сферичних зародків (морфологічна перебудова, плазмонно-індукована агрегація чи повне блокування), є окисно-відновний потенціал стабілізатора, що досліджено на прикладі структурно близьких цитрат-, бензоат- і саліцилат-йонів;

- виявлено і вперше кількісно інтерпретовано тимчасовий гіпсохромний зсув ЛППР внаслідок розведення золь декаедрів і призм як десорбцію адсорбованих йонів Аргентуму та запропоновано використовувати його як показник завершеності синтезу;

- встановлено кількісний зв'язок між довжиною хвилі опромінення та розміром декаедрів (зміна довжини хвилі опромінення на 12 нм змінює середній діаметр НЧ з 34 нм до 50 нм);

- вперше інтегровано декаедричну форму НЧ у програмний комплекс

MNPBEM (для середовища MATLAB) та вперше побудовано двовимірні карти плазмонної чутливості нанодекаедрів срібла в координатах «довжина ребра–товщина» у водних розчинах та з урахуванням повітря.

Практичне значення отриманих результатів. Одержані результати дають змогу здійснювати планування та цілеспрямований синтез наночастинок срібла декаедричної та призматичної форм. Гіпсохромний зсув ЛППР при розведенні може слугувати спектроскопічною ознакою завершеності синтезу. Розширений новою геометричною формою інструментарій MNPBEM придатний для повного моделювання електромагнітних властивостей НЧ такої форми без втрати точності порівняно з наближеними формами. Побудовані карти чутливості можуть слугувати інструментом попереднього вибору геометричних параметрів НЧ срібла під час проєктування плазмонних сенсорів у видимому діапазоні.

Ключові слова: срібло, наночастинки, колоїд, розчин, оптичні властивості, фотостимульований синтез, локалізований поверхневий плазмонний резонанс, мікроскопія, фотон, ріст, натрій цитрат, плазмонна чутливість, комп'ютерне моделювання, числові розрахунки.

ABSTRACT

Korop A. Photostimulated synthesis of silver nanoparticles and their sensing properties. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 102 – Chemistry (field of study 10 – Natural Sciences). – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2026.

The dissertation is devoted to establishing the regularities of photostimulated

synthesis of silver nanoparticles (NPs) of various morphologies in aqueous solutions, clarifying the role of photon energy and the redox properties of the stabilizer in determining the final shape of the NPs, as well as to the experimental investigation and computer modelling of the sensing properties of the resulting nanostructures.

The **introduction** substantiates the relevance of the topic, outlines its connection with the scientific programmes and plans of the Department of Chemistry and Food Expertise, formulates the aim and objectives of the study, defines the object, subject, and methods of research, and reveals the scientific novelty and practical significance of the results obtained. Information is provided on publications, presentation of the results, the personal contribution of the author, and the structure and scope of the dissertation.

The **first chapter** analyses the literature data on the physical foundations of the plasmonic properties of silver NPs, methods of their synthesis, and the principles of their sensing applications. The nature of localized surface plasmon resonance (LSPR), Mie theory for spherical metallic NPs, the resonance condition, and the quality factor and refractometric sensitivity are considered. It is shown that, among the “plasmonic” metals, silver is distinguished by the highest LSPR quality factor over a broad spectral range (300–1200 nm), while the position and width of the resonance band are determined not only by the nature of the metal but also by the size and shape of the NPs and the dielectric permittivity of the medium. Methods for the synthesis of silver NPs are described, and photostimulated synthesis is examined separately — direct photoreduction and plasmon-mediated growth of NPs together with three possible photophysical mechanisms by which LSPR excitation influences chemical transformations (the photothermal effect, concentration of the electromagnetic field near the NPs, and generation of “hot” electron–hole pairs). The mechanisms by which silver NPs operate as sensors are analysed, and it is

established that anisotropic shapes with sharp tips and edges exhibit substantially higher sensitivity than spherical NPs. Based on the literature review, a number of unresolved questions were identified, which determined the directions of further research.

The **second chapter** describes the reagents, materials, and experimental methods used in the work. A two-stage procedure for the photostimulated synthesis of silver NPs is presented, comprising the preparation of spherical seeds by borohydride reduction of silver nitrate and their subsequent irradiation with monochromatic light in a radial irradiator or in a LED-equipped stand. A range of research methods is described: spectrophotometry, atomic force microscopy (AFM), scanning (SEM) and transmission (TEM) electron microscopy, dark-field optical microscopy, cyclic voltammetry and conductometry, measurement of the electrokinetic potential and of the sedimentation stability of NP solutions, as well as refractometry of NP solutions dispersed in media with a refractive index different from that of water. The extension of the MNPBEM toolbox by the addition of the decahedral shape is described separately, enabling the electromagnetic properties of such NPs to be calculated without loss of accuracy compared with approximate shapes.

The **third chapter** presents the results of the experimental studies of photostimulated synthesis. It is established that irradiation of the same initial seed solution, stabilized with sodium citrate, with blue light ($\lambda = 450\text{--}462\text{ nm}$) leads to the formation of decahedral NPs, whereas green ($\lambda = 515\text{ nm}$), yellow ($\lambda = 595\text{ nm}$), and red ($\lambda = 633\text{ nm}$) light lead to the formation of prismatic NPs. The morphology and dimensions of the resulting NPs were confirmed by spectroscopy, SEM, and AFM. It is shown that a change in the irradiation wavelength of only 12 nm changes the mean diameter of the decahedra from 34 nm to 50 nm, all other conditions being unchanged, which demonstrates the decisive role of photon energy in determining

the morphology of the NPs. The obtained nanodecahedron sols exhibited high sedimentation stability and a negative zeta potential (down to -190 mV). For the first time, the photostimulated aggregation of NPs stabilized with sodium benzoate was studied; this occurs instead of morphological rearrangement and is a promising method for obtaining clusters of metallic particles and metamolecules. A comparative electrochemical study of citrate, benzoate, and salicylate ions established that an important parameter setting the synthetic pathway is the redox potential of the stabilizer. The weaker the reducing agent (citrate), the longer the silver ions remain in solution, having sufficient time to rearrange into thermodynamically stable shapes. An intermediate reducing agent (benzoate) causes aggregation, whereas a stronger one (salicylate) blocks the transformation altogether. A temporary hypsochromic shift of the LSPR upon dilution of the sols (~ 50 nm for the decahedra and ~ 100 nm for the prisms) was detected and, for the first time, quantitatively interpreted as desorption of adsorbed silver ions, corresponding to an increase in the charge-carrier concentration of $\sim 20\%$ and $\sim 25\%$, respectively. This shift can be used as a spectroscopic indicator of the completeness of the synthesis.

The **fourth chapter** proposes a thermodynamic approach to explaining the formation of silver nanoparticles of different shapes during photostimulated synthesis. A model is applied that depends only on the photon energy and not on the mechanism of energy transfer, with local heating accounted for through the temperature dependence of the change in Gibbs free energy ΔG . A diagram of the dependence of ΔG on the reduction potential of the reagent is constructed, and it is shown that the amount of energy that the photon introduces into the system shifts the chemical potential of the reagents and determines into which region of thermodynamic space the system is driven into (two-dimensional (2D) or three-dimensional (3D) growth). Irradiation with red and green photons shifts the driving

force into the region of 2D growth, and therefore the formation of prisms is observed. Irradiation with blue photons shifts the driving force into the region of 3D growth, and therefore decahedra are formed. The proposed model is universal and does not depend on the nature of the reagents, as confirmed by the transformation of NPs of various shapes into prisms under the action of hydrogen peroxide.

The **fifth chapter** investigates the sensing properties of silver NPs. For the first time, the decahedral shape was integrated into the MNPBEM software package (MATLAB). The refractometric sensitivity of decahedral NPs was determined experimentally: 245 nm/RIU in the water–glycerol system and 247 nm/RIU in the water–sucrose system. The obtained sensitivity values and extinction spectra generally agree with those calculated by the boundary element method. The deviation of the experimental sensitivity can be explained by the averaging of the absorption over a polydisperse ensemble of NPs compared with the idealized single-particle model, as well as by screening of the surface by the dense electric double layer. From calculations of the electromagnetic field distribution around the NPs, the nature of the plasmon modes was established, and it was shown that the maximum field enhancement is predicted at the edges of the NPs. The constructed map of the LSPR peak position as a function of the geometric parameters of the NPs makes it possible to predict the spectral position of the resonance within 440–700 nm and to select the NP size for a required wavelength. The sensitivity increases monotonically with NP size, from 150 to 550 nm/RIU in aqueous solutions. It is shown that larger NPs with the same resonance position exhibit an almost 60 % higher sensitivity than smaller particles.

The scientific novelty of the results obtained consists in the following:

- for the first time, a universal thermodynamic model for the selection of silver NP shape during photostimulated synthesis is proposed, which depends only on the photon energy and does not require identifying the specific mechanism of

energy transfer from the photon to the NP. It is shown that the energy of visible-range photons ($\approx 190\text{--}260$ kJ/mol) is commensurate with the energy of the transition from planar (2D) to bulk (3D) silver structures and determines the final morphology of the NPs;

- for the first time, it is established that an important parameter influencing the course of the photostimulated transformation of spherical seeds (morphological rearrangement, plasmon-induced aggregation, or complete blocking) is the redox potential of the stabilizer, studied using the structurally similar citrate, benzoate, and salicylate ions as examples;

- a temporary hypsochromic shift of the LSPR upon dilution of decahedron and prism sols is detected and, for the first time, quantitatively interpreted as desorption of adsorbed silver ions, and its use as an indicator of the completeness of synthesis is proposed;

- a quantitative relationship between the irradiation wavelength and the size of the decahedra is established (a change in the irradiation wavelength of 12 nm changes the mean NP diameter from 34 nm to 50 nm);

- for the first time, the decahedral NP shape is integrated into the MNPBEM software package (for the MATLAB environment), and, for the first time, a two-dimensional refractometric sensitivity map of silver nanodecahedra is constructed in "edge length–thickness" coordinates.

Practical significance of the results obtained. The results obtained make it possible to plan and carry out the targeted synthesis of silver nanoparticles of decahedral and prismatic shapes. The hypsochromic shift of the LSPR upon dilution can serve as a spectroscopic sign of the completeness of synthesis. The MNPBEM toolbox, extended with a new geometric shape, is suitable for the complete modelling of the electromagnetic properties of NPs of this shape without loss of accuracy compared with approximate shapes. The constructed sensitivity maps can

serve as a tool for the preliminary selection of the geometric parameters of silver NPs when designing plasmonic sensors in the visible range.

Keywords: silver, nanoparticles, colloid, solution, optical properties, photostimulated synthesis, localized surface plasmon resonance, microscopy, photon, growth, sodium citrate, sensing, computer modelling, numerical calculations.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus:

1. Korop, A.; Vakulenko, T.; Khalavka, Y. An Application of The Thermodynamic Approach to Explain the Shape Selection During Light-Induced Growth of Silver Nanoparticles. *Phys.Chem.Sol.State* **2026**, 27 (1), 20–26. <https://doi.org/10.15330/pcss.27.1.20-26> (Scopus). (Внесок авторів: Короп А.: експериментальний синтез НЧ, обробка результатів, візуалізація результатів, написання оригінальної чернетки; Вакуленко Т.: математичний розрахунок геометричних параметрів НЧ, співавторство; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування статті).

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus:

2. Ivanova-Tolpintseva, A. (Korop, A.); Tynkevych, O.; Diaconu, A.; Rotaru,

A.; Khalavka, Y. Synthesis and light-induced aggregation of benzoate-stabilized silver nanoparticles. *Applied Nanoscience* **2019**, (9), 709–714. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0847-0> (Scopus, Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100886227&tip=sid>). (Внесок авторів: Короп А.: синтез НЧ срібла, стабілізованих натрій цитратом, натрій бензоатом, натрій саліцилатом, дослідження їхніх оптичних властивостей, візуалізація результатів, написання оригінальної чернетки; Тинкевич О.: проведення ЦВА дослідження, обговорення результатів; Діакону А.: СЕМ-аналіз НЧ срібла, обговорення результатів; Ротару А.: СЕМ-дослідження НЧ срібла, наукове керівництво; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, обговорення результатів, перевірка та редагування статті, пошук фінансування).

3. Korop, A.; Khalavka, Y. Dynamic Processes during the Light-Induced Synthesis of Silver Nanoparticles. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 129382I (5 January 2024). <https://doi.org/10.1117/12.3016087> (Scopus). (Внесок авторів: Короп А.: проведення синтезів НЧ, дослідження їхніх оптичних властивостей, обговорення результатів, написання оригінальної чернетки, постерна доповідь; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, обговорення результатів, перевірка та редагування статті).

4. Korop, A.; Korop, M.; Vakulenko, T.; Khalavka, Y. An Extension of MNPBEM Toolbox for the Simulation of Decahedral Silver Nanoparticles' Electromagnetic Properties. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics, 138132Y (10 November 2025). <https://doi.org/10.1117/12.3093135> (Scopus). (Внесок авторів: Короп А.: експериментальний синтез НЧ,

написання тез, обговорення результатів, моделювання спектрів, побудова карти чутливості, написання оригінальної чернетки, постерна доповідь; Короп М.: розробка програмного пакету MNPBEM для моделювання електромагнітних властивостей декаедричних НЧ срібла; Вакуленко Т.: математичний розрахунок геометричних параметрів НЧ, співавторство; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування статті).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Ivanova-Tolpintseva, A (Korop, A.); Khalavka, Y. Plasmon induced synthesis of silver nanoparticles. *International Research and Practice Conference “Nanotechnology and nanomaterials”* (NANO-2017), 23-26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine, P. 683. (Внесок авторів: Короп А.: експериментальний синтез НЧ, написання тез, обговорення результатів, написання оригінальної чернетки; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування тез).

6. Каланча В.; Іванова-Толпінцева А. (Короп А.); Войтович С.; Халавка Ю. Фотостимульований синтез наночастинок срібла. *X Українська наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених. Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2017): тези доповідей*, Вінниця, Україна, 2017. С. 84. (Внесок авторів: Каланча В.: синтез НЧ срібла, обговорення результатів; Короп А.: синтез НЧ срібла, обговорення результатів, написання тез; Войтович С.: Одержання мікрофотографій НЧ срібла за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування тез, пошук фінансування).

7. Korop A.; Khalavka Y., Photostimulated synthesis of decahedral silver nanoparticles. *International Freik Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (ICPTTFN-XVIII)*, 11-16 October 2021, Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 38. (Внесок авторів: Короп А.: синтез НЧ срібла, обговорення результатів, написання тез; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування тез).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Драпак, С. І., Іванова-Толпінцева, А. О. (Короп А. О.), Халавка, Ю. Б. Фотостимульований синтез наночастинок благородних металів. *Науковий вісник Чернівецького університету. Хімія*. Чернівці, 2019. № 819. С. 57–82. (Внесок авторів: Драпак С.: аналіз літератури, написання оригінальної чернетки; Короп А.: обговорення та вибір джерел для огляду літератури, написання частини тексту про декаедричні НЧ срібла; Халавка Ю.Б.: наукове керівництво, формулювання концепції дослідження, співавторство, обговорення результатів, перевірка та редагування тексту огляду).