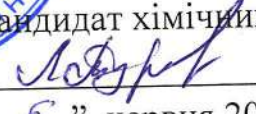




ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи і
міжнародної діяльності
Карпатського національного університету
імені Василя Стефаника,

кандидат хімічних наук, доцент

 Лілія ТУРОВСЬКА
“ 5 ” червня 2026 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 2 від 04 червня 2026 р. фахового семінару кафедри прикладної фізики і матеріалознавства фізико-технічного факультету Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

ПРИСУТНІ:

Коцюбинський В. О. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства – голова семінару;

Рачій Б. І. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства – секретар семінару;

Ільницький Р. В. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства – гарант даної ОНП, член семінару, науковий керівник;

Будзуляк І. М. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства – член семінару;

Яремій І. П. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства – член семінару;

Гасюк І. М. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства, декан фізико-технічного факультету – член семінару;

Бойчук В. М. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства, проректор з науково-педагогічної роботи та соціально-економічного розвитку – член семінару;

Яблонь Л. С. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та астрономії – член семінару;

Салій Я. П. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор фізики і астрономії – член семінару;

Горічок І. В. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики і астрономії – член семінару;

Мандзюк В. І. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки – член семінару;

Никируй Л. І. – кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики і астрономії – член семінару.

З присутніх – 11 докторів наук та 1 кандидат наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Головуючий на фаховому семінарі – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Коцюбинський В.О.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію про дисертацію та здобувача

Дисертантка Мокляк Марія Геннадіївна, 4 року навчання денної (державної) форми навчання за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. Дисертація на тему «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні властивості нанокомпозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Тему дисертації «Механізми фотокаталітичної та електрохімічної активності нанокомпозитів на основі оксид/гідроксидних фаз перехідних металів» затверджено на засіданні Вченої ради Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника» (протокол № 11 від 28 грудня 2021 р.) та уточнена «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні властивості нанокомпозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту» на засіданні Вченої ради Карпатського національного університету імені Василя Стефаника (протокол № 05 від “24” лютого 2026 року). Науковим керівником затверджений доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Ільницький Роман Васильович.

2. Виступ здобувачки Мокляк Марії Геннадіївни

Актуальність теми дослідження (слайд 1) зумовлена необхідністю подальшої розробки нових типів функціональних матеріалів з покращеними каталітичними та термомагнітними експлуатаційними характеристиками для їх потенційного застосування у каталізі та біомедицині.

Особлива увага (слайд 2) приділяється ролі наночастинок мідного фериту в системах очищення води як фотокаталізаторів, що працюють у видимому світлі, для видалення поллютантів різних типів. Перевагами феритів міді CuFe_2O_4 є: можливість використання двох Фентон-пар $\text{Cu}^{2+} \leftrightarrow \text{Cu}^+$ та $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$, висока фотокаталітична активність у видимому діапазоні, магнітна керованість, низька токсичність, екологічна сумісність.

Ефективними стратегіями модифікації та дизайну наноферитів є (слайд 3): вибір багатофакторного методу синтезу, катіонне легування, формування нанокомпозитів/гетеропереходів. Це покликано покращувати фотокаталітичну ефективність шляхом: формування оптимальної зонної структури, пригнічення

електрон-діркової рекомбінації, розвитку реакційної поверхні, формування архітектури багатоцентрового каталізу.

Окрема увага приділяється ролі наноферитів різної архітектури в колоїдних системах індукційного нагріву біомедичного спрямування в сфері магнітної гіпертермії як потенційним конкурентам класичному магнетиту (слайд 4). Для ефективного теплоутворення необхідний делікатний баланс між: магнітними характеристиками, структурними особливостями, колоїдною стабільністю дисперсій наночастинок. Це визначає їх подальший: біорозподіл (ефект місцевого накопичення), утримання (уникнення імунного маркування), однорідність нагрівання.

Сучасна проблематика (слайд 5) досліджень у галузі функціональних наноматеріалів екологічного та біомедичного призначення зосереджена на наступному: 1. Фотокаталітична деструкція поллютантів – проблема 1: необхідність заміни класичних широкозонних фотокаталізаторів оксидів титану і цинку на матеріали з поглинанням у видимій частині спектру; проблема 2: необхідність підсилення сорбційних характеристик фотокаталізатора для активного захоплення поллютанта і швидкого залучення його у деструкційні процеси; проблема 3: пошук можливостей застосування магнітокерованих фотокаталізаторів для активного управління матеріалом на всіх стадіях каталітичних процесів з можливістю його швидкого вилучення та рециркулювання уникаючи складних фільтраційних систем; 2. Біомедичні застосування, магнітна гіпертермія – проблема 1: необхідність заміни класичного магнітного агента нанорозмірного магнетиту на біосумісні матеріали з підвищеними магнітними характеристиками для кращого термомагнітного відгуку в клінічно значущих умовах магнітних полів і температур; проблема 2: пошук наноструктурованих матеріалів з підвищеною колоїдною стабільністю у водних та фізіологічних середовищах.

Наша пропозиція щодо поставленої проблематики (слайд 6) – це дослідження фундаментальних аспектів керованого синтезу та формування функціональних властивостей композитних наноструктур з використанням феритів міді ($E_g=2,0$ eV) з структурно-чутливим і катіонно-варіаційним феримагнетизмом та можливістю оптимального налаштування зонної структури як магнітокерованих фотокаталізаторів видимого діапазону випромінювання та магнітних агентів для біомедичних застосувань з оптимізованим термомагнітним відгуком та підвищеною колоїдною стабільністю.

На основі чого сформульовано мету досліджень.

Метою дисертаційного дослідження є встановлення фізичних закономірностей формування структури, фазового стану та катіонного розподілу у наноструктурованих феритах міді та Nd-вмісних нанокompозитах на їх основі, синтезованих методом золь-гель автоспалювання, а також у з'ясуванні їх впливу

на магнітні, електронні, оптичні та функціональні властивості в каталітичних системах очищення води і колоїдних системах індукційного нагріву.

Обрана мета дослідження є своєчасною, спрямована на розвиток екологічно безпечних і високотехнологічних матеріалів нового покоління, що відповідає 4 векторам сталого розвитку згідно наукометричної бази SCOPUS.

Завдання дослідження (слайд 7):

- оптимізувати умови методу золь-гель автоспалювання (тип і вміст хелатуючого агента, рН реакційного середовища, температуру та тривалість відпалу) для синтезу наноструктурованих феритів міді та Nd-вмісних нанокомпозитів на їх основі із контрольованими параметрами;
- дослідити вплив умов синтезу та катіонного заміщення на структурно-фазовий стан, морфологічні параметри, фізико-хімічні властивості отриманих матеріалів та встановити їх взаємозв'язки і кореляції;
- дослідити фотокаталітичну активність синтезованих матеріалів у водних розчинах модельних барвників різного типу і їх сумішей;
- встановити зв'язки фотокаталітичної активності з структурно-морфологічними параметрами і фізико-хімічними властивостями досліджуваних матеріалів;
- дослідити термомагнітні функціональні характеристики синтезованих матеріалів в колоїдних системах індукційного нагріву та зв'язки із їхніми магнітними і структурно-морфологічними характеристиками.

Об'єкт дослідження – процеси формування структури і морфології феритів міді та Nd-вмісних нанокомпозитів на їх основі при отриманні модифікованими методами золь-гель автоспалювання та формування їх функціональних властивостей для застосування в каталітичних системах очищення води і колоїдних системах індукційного нагріву.

Предмет дослідження – взаємозв'язки між умовами синтезу, структурно-морфологічними параметрами, фізико-хімічними властивостями та каталітичною активністю синтезованих матеріалів в системах очищення води і їх термомагнітними функціональними характеристиками в колоїдних системах індукційного нагріву.

Стратегія модифікації та варіації умов методу золь-гель автоспалювання (слайд 8): здійснено варіацію таких факторів як стехіометрія прекурсор/хелат, рівень рН реакційного середовища, включення легуючої домішки неодиуму та температура і тип атмосфери постсинтезного відпалу та досліджено їх вплив на структурно-морфологічні і фізико-хімічні характеристики феритів міді і нанокомпозитів на їх основі. Зокрема, (слайд 9) встановлено, що рН середовища визначає кінцевий фазовий склад матеріалу як високотемпературну форму фериту міді з домішками делафоситу та його функціональні характеристики. Застосування (слайд 10) відпалу розкрило тетрагонально-кубічну еволюцію шпінельної структури в різних атмосферах. Відпал ініціює перетворення

делафоситу на високотемпературну кубічну форму фериту міді із включеннями гематиту, а при охолодженні – повна трансформація в стабільну тетрагональну форму з наростанням гематиту при вищих температурах відпалу. Структурна еволюція зумовлює зміну механізму провідності із стрибкового на змішаний.

За умови надлишку (25%) хелату (слайд 11) також отримано макропористі композити із вмістом делафоситу ($\approx 8\%$). Виявлено стабільність морфології і складу композиту, а також магнітних параметрів. Усі характеристики зберігають свої значення порівняно із феритом міді отриманого за умов прекурсор/хелат = 1/1 та pH=7.

Умови ініціації дефіциту хелату (слайд 12) і включення легуючої домішки неодиму, дозволяють реалізувати дві головні ідеї досліджень: 1) створити передумови формування супутніх оксидних фаз CuFeO_2 , CuO для конструювання нанокompозитів; 2) спричинити активний вплив на розподіл катіонів та щільність дефектів.

В результаті (слайд 13) синтезовано трикомпонентні композити з домінуючою фазою Nd-вмісного мідного фериту кубічної симетрії, з сумарним вмістом супутніх фаз $\approx 12\text{--}18\%$, і виявлено тенденцію щодо їх перерозподілу із збільшенням вмісту неодиму в сторону зменшення делафоситу з наступною стабілізацією на рівні 6%.

SEM, TEM-аналіз (слайд 14) підтверджує формування нарозмірних кристалітів, які є агломерованими у вигляді стінок макропористої матриці. EDX підтверджує вміст очікуваних елементів і динаміку заміщення неодимом. Константи пружності демонструють незначне зростання при допуванні неодимом, що підтверджує дані XRD щодо розвитку пружно-напруженого стану домінуючої фази.

Запропоновано механізм формування композиту (слайд 15), що передбачає ініційований катіонний перерозподіл в шпінельній структурі з вимушеною міграцією іонів Fe^{3+} в тетраедричні позиції і частковим витісненням Cu^{2+} із структури фериту. Це зумовлює паралельне формування додаткових фаз делафоситу і оксиду міді (II). Збільшення ступеня заміщення неодимом призводить до зменшення розміру кристалітів домінуючого фериту і до перерозподілу вмісту додаткових фаз. В результаті фіксуємо розвиток макропористої губчастої морфології нанокompозитів, основним елементом яких є сферичні наночастинки ($\sim 20\text{--}30$ нм) домінуючої фази фериту міді декоровані поверхневими наноострівцями фаз оксиду міді (II) та делафоситу.

Оптичні дослідження (слайд 16) підтверджують формування гетеропереходів (Тип-II) з каскадним розташуванням енергетичних зон, що забезпечує просторове розділення зарядів на міжфазному інтерфейсі через різний тип провідності фаз. В результаті конкуруючого впливу розмірного ефекту, внеску 4f станів допанта та наростаючого структурного безладу зафіксовано локальний мінімум 2,82 eV для зразка $x=0,05$.

Для усіх систем зразків проведено фотокаталітичні дослідження. (слайд 17). Для композиту P1 (pH=1), з розмірами фериту (≈ 12 нм) і максимальним вмістом делафоситу (11%), зафіксовано синергетичне підсилення фотокаталізу з швидкістю деградації $0,0206 \text{ хв}^{-1}$ і 99,3% розкладу MB за 180 хв.

Встановлено, що тетрагонально-кубічна еволюція шпінельної структури забезпечує високу ефективність фотокаталізу для обох кристалічних форм порядку $\approx 0,021 \text{ хв}^{-1}$ для MG при відпалі (до 500°C), оскільки ріст розмірів кристалітів ≥ 24 нм зумовлює падіння константи реакції вдвічі.

Встановлено, що при рості вмісту H_2O_2 ступінь деградації MB зростає нелінійно з виходом на плато 0,1-0,35 моль%, а кисле середовище (pH=2) сприяє фотокаталізу на цих композитах і забезпечує 100% деструкцію за 160 хв.

Для композитів, які отримані при надлишку (25%) хелату, порівняльний аналіз фотокаталізу вказує ефективну деградацію усіх трьох типів барвників із збільшенням швидкості в ряду родамін Б $\rightarrow$ MB $\rightarrow$ MG від 0,0155 до $0,0184 \text{ хв}^{-1}$.

Фотокаталіз в трикомпонентних системах (слайд 18) зосереджений на подвійних гетеропереходах, які забезпечують паралельний багатоцентровий каталіз із генерацією повного комплексу радикалів на межовому інтерфейсі.

Синергетичне підсилення фіксується для заміщення $x=0,05$ та $0,09$ як прояв таких конкуруючих впливів як мінімізація ширини забороненої зони домінуючої фази фериту ($x=0,05$), мінімізація розміру кристалітів ($x=0,09$), максимальний вміст оксиду міді (7,6% для $x=0,09$) та величина і знак потенціалу заряду поверхні каталізатора (+34,24 мВ, максимум для $x=0,05$). Останній фактор є визначальним для перебігу реакції нульового чи першого порядку в залежності від катіон/аніонної природи барвника, оскільки призводить до електростимульованої адсорбції (CR) чи до ефекту відштовхування (MB). Максимум фотокаталізу зафіксовано для композиту з $x=0,09$ – $0,0186 \text{ хв}^{-1}$ для (MB) та $0,0116 \text{ хв}^{-1}$ для (CR). Для (MB) зафіксовано фотокаталіз з 2 часовими зонами із зміною порядку реакції з нульового на перший, а для (CR) зафіксовано часткове блокування реакції через пасивацію інтермедіатами для зразків із мінімальними кристалітами.

Для катіон-аніонної суміші (слайд 19) формування нейтральних комплексів усуває ефект відштовхування і зумовлює зближення барвників на поверхні композитів. Це спричиняє синхронний характер їх фотодеструкції як цілісного супрамолекулярного комплексу

Динаміка процесу є нелінійною із зонами сповільнення реакції, що сильніше проявляється для MB. Зниження максимального ступеня деградації обидвох барвників порівняно із їх одинарними розчинами становить $\approx 20\%$, причому максимальну активність також демонструють зразки $x=0,09$ та $0,05$. Для зразка із $x=0,09$ швидкості рівні $0,0041 \text{ хв}^{-1}$ для MB та $0,0030 \text{ хв}^{-1}$ для CR.

Термомагнітні дослідження (слайд 20) проведено для відпалених феритів міді та Nd-вмісних мідних феритів для виявлення потенціалу їх застосування в магнітній гіпертермії. Встановлено, що термічна еволюція шпінельної структури

суттєво впливає на намагніченість насичення та коерцитивну силу. Зафіксовані значення SAR $\sim 30\text{--}32$ Вт/г та ILP $\sim 1,5\text{--}1,6$ нГн·м²/кг, отримані за моделями Бокса–Лукаса та охолодження Ньютона, показали, що наночастинки виявляють ефективний індукційний нагрів, причому відпалені зразки зберігають високі термомагнітні характеристики.

Для систем $\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ (слайд 21) усі зразки демонструють чітко виражені петлі гістерезису, які є характерними для феримагнітних матеріалів. Максимальна намагніченість $62,1$ А·м²/кг і висока анізотропія ($K_1 = 0,37 \times 10^5$ ерг/см³) зафіксована для зразка з $x=0,05$, який також демонструє найвищу колоїдну стабільність із максимальним значенням дзета-потенціалу ($+34,24$ мВ) та помірний час релаксації τ_N ($14,00$ нс). Синергія цих параметрів зумовлює найвищі значення SAR (понад 33 Вт/г) та ILP понад $0,163$ нГн·м²/кг для цього матеріалу, що вказує на високу здатність до нагрівання у клінічно релевантних умовах прикладеного змінного магнітного поля ($23,8$ кА/м, 357 кГц). Однак, ця залежність не є лінійною, оскільки зразок із $x = 0,11$ показав високий SAR ($33,43$ Вт/г) попри нижчу намагніченість насичення $46,91$ А·м²/кг, що вказує на підсилюючий вплив анізотропії та релаксації. Отримані результати свідчать про можливість прецизійного контролю режиму релаксації Нееля і вказують на стратегію дизайну наноферитів з оптимізованим термічним відгуком.

В дисертації зроблено наступні висновки:

1. Здійснено оптимізацію умов методу золь-гель автоспалювання шляхом варіації ряду технологічних факторів таких як рівень рН реакційного середовища, стехіометрія прекурсор/хелат, включення легуючої домішки Nd та температура і тип атмосфери постсинтезного відпалу, що визначає кінцевий фазовий склад матеріалу як домінуючу ($> 85\%$) метастабільну високотемпературну форму фериту міді кубічної симетрії з наявними домішками фаз делафоситу чи/та простих оксидів металів.

2. Встановлено фізичні закономірності формування структурно-фазового стану нанокомпозитів на основі Nd-вмісного фериту міді та запропоновано відповідний механізм, що передбачає ініційований катіонний міжпозиційний перерозподіл в шпінельній структурі внаслідок розмірного ефекту іонів Nd^{3+} з вимушеною міграцією катіонів Fe^{3+} в тетраедричні позиції і частковим витісненням Cu^{2+} із структури фериту. За умови дефіциту хелатуючого агенту це створює передумови до формування на етапі дендритного росту розвиненої макропористої губчастої морфології нанокомпозитів, основним елементом яких є сферичні наночастинки ($\sim 20\text{--}30$ нм) домінуючої фази Nd-вмісного фериту міді декоровані поверхневими наноострівцями фаз оксиду міді (II) та делафоситу.

3. Запропоновано одностадійний спосіб формування дво- та трикомпонентних гетеропереходів (Тип-II) з каскадним розташуванням енергетичних зон типу $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ та $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$, що забезпечує ефективне просторове розділення зарядів на міжфазному інтерфейсі в

результаті різного типу провідності домінуючої шпінельної фази та ініційованих додаткових фаз.

4. З'ясовано, що у композитах $\text{CuO/CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ зміни ширини забороненої зони фериту міді при заміщенні іонами Nd^{3+} формуються в результаті конкуруючого впливу розмірного ефекту для нанокристалітів, внеску 4f станів допанта та наростаючого структурного безладу, що призводить до формування локального мінімуму 2,82 еВ для складу $\text{CuNd}_{0,05}\text{Fe}_{1,95}\text{O}_4$.

5. Для двокомпонентних композитів $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ з мінімальними розмірами кристалітів шпінельної фази (≈ 12 нм при $\text{pH}=1$) та максимальним вмістом делафоситу (11%), досягнуто швидкості деградації $0,0206 \text{ хв}^{-1}$ та встановлено, що тетрагонально-кубічна еволюція шпінельної структури забезпечує високу ефективність фотокаталізу для обох кристалічних форм порядку $\approx 0,021 \text{ хв}^{-1}$ для малахіту зеленого за умови обмеження розмірів кристалітів < 24 нм. З'ясовано, що при зростанні вмісту H_2O_2 ступінь деградації метиленового синього зростає нелінійно з виходом на плато в діапазоні 0,1-0,35 моль%, а кисле середовище ($\text{pH}=2$) сприяє фотокаталізу і забезпечує 100% деструкцію барвника за 160 хв.

6. Синергетичне підсилення фотокаталізу зафіксовано для трикомпонентних композитів $\text{CuO/CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ з як прояв таких конкуруючих впливів як мінімізація ширини забороненої зони фериту ($x=0,05$), мінімізація розміру нанокристалітів ($x=0,09$), максимальний вміст фази оксиду міді (7,6% для $x=0,09$) та величина і знак потенціалу поверхні каталізатора (+34,24 мВ для $x=0,05$). Швидкості реакції становлять $0,0186 \text{ хв}^{-1}$ для метиленового синього та $0,0116 \text{ хв}^{-1}$ для конго червоного для заміщення Nd^{3+} $x=0,09$. Для метиленового синього зафіксовано механізм фотокаталізу із зміною порядку реакції з нульового на перший, а для конго червоного виявлений перехід в зону часткового блокування реакції в результаті пасивації поверхні інтермедіатами.

7. Для складних катіон-аніонних сумішей встановлено високосинхронний характер багатоцентрового фотокаталізу окремих складових барвників із спільним механізмом фотодеструкції як одного цілісного супрамолекулярного комплексу. Виявлено нелінійну динаміку процесу деструкції суміші з наявними періодичними зонами сповільнення реакції пов'язаними із особливостями транспорту нейтральних катіон-аніонних супрамолекулярних комплексів складної геометрії в макропористу структуру композитів з наявним позитивним дзета-потенціалом їх поверхні. В результаті зафіксовано типове зниження констант реакції псевдопершого порядку відповідно $0,0041 \text{ хв}^{-1}$ для метиленового синього та $0,0030 \text{ хв}^{-1}$ для конго червоного та зниження ступеня деградації обидвох барвників порівняно із їх одинарними розчинами порядку $\approx 20\%$. Максимальні показники демонструють трикомпонентні композити $\text{CuO/CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ із вмістом Nd^{3+} $x=0,05$ та $0,09$ із досягненням однакового ступеня максимальної деградації обидвох барвників $\approx 73\%$.

8. Для нанокompозитів $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ та $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ виявлено синергетичний ефект підсилення термомагнітного відгуку у клінічно релевантних умовах прикладеного змінного магнітного поля (23,8 кА/м, 357 кГц) з досягненням значень $\text{SAR} > 33$ Вт/г та $\text{ILP} > 0,16$ нГн·м²/кг як прояв таких взаємопідсилюючих впливів у випадку зразка із вмістом Nd^{3+} як максимальна намагніченість (62,1 А·м²/кг), висока анізотропія ($K_1 = 0,37 \times 10^5$ ерг/см³), найвища колоїдна стабільність із максимальним значенням дзета-потенціалу (+34,24 мВ) та помірний час релаксації Нееля τ_N (14,00 нс). Значення $\text{SAR} \sim 30\text{--}32$ Вт/г та $\text{ILP} \sim 0,15\text{--}0,16$ нГн·м²/кг отримані для двокомпонентних систем $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ демонструють ефективний індукційний нагрів і для випадку термічно відпалених зразків, незважаючи на тетрагонально-кубічну трансформацію шпінельної структури із відповідною зміною магнітних властивостей, що вказує на гнучкість стратегії варіативного дизайну наноферитів з оптимізованим термічним відгуком для біомедичних застосувань.

3. Запитання до здобувача по темі дисертації:

1. Д. ф.-м. н., проф. Гасюк І.М.:

Чим обумовлений вибір заміщення іонами неодиму з точки зору формування гетеросистем? І розпад фериту зумовлений умовами синтезу чи вмістом іонів неодиму?

Мокляк М.Г. Стосовно вибору заміщення іонами неодиму, то була вибрана стратегія модифікації феритів міді іонами рідкоземельних 4f елементів для формування електронних пасток і зменшення електрон-діркової рекомбінації. Водночас висувалася умова ефективної магнітокерованості матеріалів та оптимізації їх термомагнітних властивостей. Тому, зважаючи на ці два фактори, для заміщення було обрано неодим, враховуючи його можливості модифікації як електронної структури так і магнітних характеристик. Стосовно питання щодо розпаду фериту при заміщенні неодимом, то нами зафіксовано формування композитного трикомпонентного матеріалу з додатковими фазами, які ми ініціювали умовами синтезу, а саме застосуванням 10% дефіциту хелатуючого агента. Однак слід відзначити, що ріст вмісту неодиму насправді спричиняє як зменшення розміру кристалітів домінуючої фази фериту, так і перерозподіл фаз делафоситу і оксиду міді при їх загальному вмісті в композиті 13-14% для всіх ступенів заміщення. При цьому вміст фази оксиду міді зростає із ростом заміщення іонами неодиму з максимумом для $x=0,09$.

2. Д. ф.-м. н., проф. Мандзюк В.І.:

Як конкретно впливає морфологія отриманих матеріалів на фотокаталіз і магнітну гіпертермію у вашому випадку?

Мокляк М.Г. Загалом і для фотокаталізу, і для магнітної гіпертермії встановлено взаємопідсилюючий вплив цілого ряду факторів, в тому числі і

морфологія отриманих матеріалів. Зокрема, встановлено чіткий взаємозв'язок між мінімізацією розмірів кристалітів домінуючої фази і високими значеннями їх фотокаталітичної активності та термомагнітного відгуку.

3. Д. ф.-м. н., проф. **Яблонь Л.С.:**

В роботі наголошено на розвиток пористої морфології отриманих матеріалів в результаті росту дендритної структури. Чи проведено відповідні вимірювання ступеня їх пористості?

Мокляк М.Г. Для такого типу матеріалів безпосередні вимірювання питомої площі поверхні методом сорбції азоту не є застосовними в повній мірі, оскільки макропори не забезпечують ефективну сорбцію і отримані результати є не інформативними. При цьому слід відзначити, що при проведенні термогравіметричних досліджень зафіксовано зменшення насипного об'єму матеріалу в десятки разів при зміні його маси не більше 2-3%, що опосередковано підтверджує SEM і TEM аналіз цих матеріалів щодо розвитку їх характерної макропористої структури.

4. Д. ф.-м. н., проф. **Коцюбинський В.О.:**

В роботі запропоновано механізм катіонного перерозподілу в структурі фериту міді на основі порівняльного аналізу та зроблено висновок щодо зміни ступеня інверсності цієї фази. Уточніть які методи для цього застосовано і як було оцінено ступінь інверсності?

Мокляк М.Г. Порівняльний аналіз проведено за даними XRD досліджень і месбауерівської спектроскопії. Ступінь інверсності як вміст іонів міді в В-позиціях визначено за даними XRD досліджень за методом Берто. Зафіксовано відповідно зменшення цього параметру із ростом заміщення іонами неодиму. Зважаючи на дані месбауерівської спектроскопії щодо відповідного наростання вмісту іонів заліза в А-позиціях, було зроблено висновок, що саме цей фактор призводить до перерозподілу вмісту додаткових фаз у нанокompозитах з відповідним наростанням фази оксиду міді як прояв зменшення ступеня ступеня інверсності фериту і зменшенням входження іонів міді в його структуру.

5. К. ф.-м. н., проф. **Никируй Л.І.:**

Відомо про термостимульовану дифузію іонів міді на гетеропереходах у композитних системах при формуванні фізичного контакту. Чи враховувався цей фактор у ваших дослідженнях?

Мокляк М.Г. Застосування методу золь-гель автогоріння та ініційований нами дефіцит хелатуючого агенту забезпечували паралельне формування усіх трьох фаз одночасно на лінії фронту самопоширювальної реакції автогоріння з ростом дендритного утворення. Це передбачає різкий підйом температури синтезу до температур феритоутворення і наступне різке гартування, що зводить до мінімуму будь-які постсинтезні дифузійні процеси. Опосередковано це також підтверджується "заморожуванням" високотемпературної кубічної фази шпінелі при гартуванні.

6. Д. ф.-м. н., проф. **Яремій І.П.:**

Згідно XRD аналізу ваші композити містять три фази. Яким чином ви пояснюєте наявність шести піків на лініях диференціального аналізу відповідних побудов Таука і чому не було застосовано класичний метод побудов Таука для визначення ширини забороненої зони отриманих матеріалів?

Мокляк М.Г. Класичний підхід передбачає лінійну апроксимацію краю фундаментального поглинання з використанням побудови Таука для однофазного матеріалу. В нашому випадку цей підхід був ускладнений тим, що побудова Таука для композитного матеріалу являє собою кусково-лінійну функцію із відповідними вкладками від різних фаз. Застосування диференціального підходу дозволило розділити ці вкладки, і вони були ідентифіковані відповідно як три різні фази – 1,5 еВ для оксиду міді, 2,1 еВ для дельтафоситу і 2,9 еВ для домінуючого фериту, і ще три супутні піки біля кожного із них, які відповідають пограничним дефектним областям цих фаз. Хоча, не виключений варіант, що піки із значеннями > 2,2 еВ можуть належати прихованій фазі магеміту, яка маскується під домінуючою фазою фериту міді і не може бути прямо виявлена жодним із застосованих методів дослідження.

7. Д. ф.-м. н., проф. **Горічок І.В.:**

Ваш графік щодо синхронної нелінійної динаміки змін константи реакції псевдопершого порядку обидвох барвників у реакційній катіон-аніонній суміші, чи не є він статистичним розкидом експериментальних точок?

Мокляк М.Г. Однозначна ні. Цей графік є відображенням часових залежностей логарифмів їх відносної концентрації на яких чітко видно періодичні зони сповільнення реакції фотокаталізу, які включають по кілька експериментальних точок. Окрім того, як ми вказали, ці залежності є синхронізованими між собою для двох типів барвників у модельній суміші, що також вказує на наявність зафіксованої нелінійної динаміки цих параметрів і заперечує припущення щодо їх статистичного характеру.

8. Д. ф.-м. н., проф. **Бойчук В.М.:**

Які перспективи застосування отриманих вами матеріалів у біомедицині?

Мокляк М.Г. Проведені дослідження свідчать про клінічно значущу ефективність термомагнітного відгуку в колоїдних системах індукційного нагріву на основі синтезованих композитних матеріалів, що вказує на потенційні можливості композитної архітектури матеріалів для використання в магнітній гіпертермії та на можливі стратегії варіативного дизайну наноферитів з оптимізованим термічним відгуком для біомедичних застосувань.

9. Д. ф.-м. н., проф. **Рачій Б.І.:**

Вами проводилися дослідження впливу надлишку хелатуючого агенту на формування структури феритів міді. Чому аналогічні умови синтезу не були застосовані для випадку заміщення неодимом?

Мокляк М.Г. Нами було показано, що матеріали отримані за умови надлишку хелатуючого агента практично повністю відтворюють показники зразків, отриманих за умови стехіометричного співвідношення прекурсор /хелат. На основі цих даних для формування трикомпонентних композитів нами і було вибрано стратегію створення дефіциту хелатуючого агента.

10. Д. ф.-м. н., проф. **Салій Я.П.:**

Запропонований вами механізм просторового розділення зарядів на різних фазах гетероструктури може бути реалізований за умови наявних містків провідності між цими фазами, як ви це пояснюєте?

Мокляк М.Г. Зважаючи на результати FTIR та ДТГ аналізу, ми стверджуємо, що провідність на межовому інтерфейсі забезпечується залишками вуглецевого каркасу, який якраз і сприяє формуванню розвиненої макропористої структури, та міжзеренній провідності окремих фаз композитів.

4. Виступ наукового керівника доктора фізико-математичних наук, професора кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Ільницького Р.В.:

Мокляк Марія Геннадіївна вчасно виконувала всі розділи індивідуального плану наукової роботи в установлені терміни. Своєчасність та повнота виконання індивідуального плану аспірантки підтверджена результатами піврічної проміжної, підсумкової (річної) та заключної атестацій.

Аспірантка Марія Геннадіївна самостійно виконувала експериментальні дослідження та опрацювала великий об'єм наукової літератури. Основні результати, отримані в процесі виконання роботи, в повній мірі опубліковані в наукових фахових виданнях.

Вважаю, що дисертація Мокляк Марії Геннадіївни на тему «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні властивості нанокомпозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту» повністю відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 № 44 та Вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами), та може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

5. Виступи присутніх членів семінару з оцінкою дисертації

Д. ф.-м. н., проф. **Будзуляк І.М.:**

Дисертація містить велику кількість експериментального матеріалу та широкий спектр застосованих методів дослідження для комплексної характеристики синтезованих матеріалів. Це дозволяє зробити глибокий аналіз, тому потрібно більш широко презентувати взаємодоповнюваність цих методів

дослідження. Проте необхідно відредагувати презентацію і скоротити доповідь. У цілому, дисертація відповідає всім вимогам і може бути допущена до захисту.

Д. ф.-м. н., проф. **Рачій Б.І.:**

Дисертаційна робота є цікавою, актуальною і відповідає цілям сталого розвитку суспільства. Робота має як наукове, так і практичне значення, зокрема щодо розробки матеріалів як екологічного, так і біомедичного спрямування. Отримані висновки дослідження можна використовувати для подальших досліджень в цих напрямках. Вважаю роботу комплексною та такою, що може бути допущена до розгляду в разовій спеціалізованій вченій раді.

Д. ф.-м. н., проф. **Гасюк І.М.:**

Дисертаційна робота є комплексною, зроблена велика кількість досліджень та здійснено аналіз формування структури, фізико-хімічних і функціональних властивостей отриманих матеріалів. Робота виконана послідовно і логічно завершена, починаючи від синтезу і закінчуючи дослідженнями функціональних характеристик в цільових сферах застосування. Загалом робота повністю відповідає всім вимогам та підлягає допуску до захисту.

Д. ф.-м. н., проф. **Коцюбинський В.О.:**

Робота Мокляк Марія Геннадіївна є завершеним комплексним дослідженням проблем керованого синтезу, всестороннього аналізу та формування функціональних властивостей композитних матеріалів на основі Nd-вмісного мідного фериту. Побудовано цілий ряд адекватних повноцінних моделей, які інтерпретують і пояснюють ті явища, що були експериментально спостережувані як на етапах синтезу матеріалів, так і при дослідженні їх функціональних властивостей в сферах фотокаталізу і магнітної гіпертермії.

Результати роботи опубліковані в наукових журналах, які входять до наукометричної бази Scopus, тому я вважаю, що дисертантка заслуговує того, щоб представити свою роботу на захисті в разовій спеціалізованій вченій раді.

Під час обговорення позитивну оцінку дисертації Мокляк Марії Геннадіївни висловили всі члени семінару.

Заслухавши публічну презентацію наукових результатів дисертації Мокляк Марії Геннадіївни та обговоривши її на фаховому семінарі кафедри прикладної фізики і матеріалознавства прийнято наступні висновки щодо дисертації: рекомендувати для подання до розгляду та захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

6. Висновок про перевірку дисертації та наукових публікацій здобувачки на виявлення порушення академічної доброчесності.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий **висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення** результатів дисертації:

Висновок
наукового фахового семінару
кафедри прикладної фізики і матеріалознавства
фізико-технічного факультету

Карпатського національного університету імені Василя Стефаника
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації на тему «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні
властивості нанокompозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту»
здобувачки ступеня доктора філософії Мокляк Марії Геннадіївни
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(галузь знань 10 Природничі науки)

1. Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю подальшої розробки нових типів функціональних матеріалів з покращеними каталітичними та термомагнітними експлуатаційними характеристиками для їх потенційного застосування у каталізі та біомедицині. Особлива увага приділяється ролі наночастинок мідного фериту в системах очищення води, зокрема їх використанню як адсорбентів та фотокаталізаторів, що працюють у видимому світлі, для видалення барвників, важких металів та фармацевтичних препаратів. Наночастинки мідного фериту та композити на їх основі являють собою перспективний клас багатофункціональних наноматеріалів для екологічного застосування завдяки поєднанню низької токсичності та екологічної сумісності, ефективної магнітної роздільності, високій фотокаталітичній активності під впливом видимого світла. Їхня магнітна/суперпарамагнітна природа забезпечує їх ефективне видалення з реакційного середовища та повторне використання, що є економічно та екологічно привабливим, усуваючи необхідність в енергоємних методах розділення, таких як фільтрація та центрифугування. Такі стратегії, як катіонне легування та формування нанокompозитів/гетеропереходів, розглядаються на предмет їхньої здатності покращувати фотокаталітичну ефективність та пригнічувати електрон-діркову рекомбінацію. Окрім того, оцінюються методи зеленого синтезу з використанням біологічних агентів або реагентів з низьким впливом на навколишнє середовище на предмет їхньої стійкості та практичного застосування. Такі фактори, як рН, температура кальцинації, стехіометрія прекурсора та включення легуючої домішки, відіграють ключову роль у визначенні розміру кристалітів, морфології, фазової стабільності, намагніченості насичення, коерцитивної сили та реакційної здатності поверхні.

Легування іонами рідкісноземельних елементів, які мають порожні чи частково заповнені 4f-орбіталі, пропонує перспективну стратегію для зменшення електрон-діркової рекомбінації, підвищення квантової ефективності та модифікації магнітних характеристик. Однак, підвищення каталітичної активності

не повинно покладатися виключно на зменшення ширини забороненої зони. Ефективний дизайн нано- та гетероструктур повинен також враховувати вирівнювання зон, перенесення заряду на межі розділу, площу поверхні та синергетичні ефекти для оптимізації каталітичного розкладу барвників та органічних забруднювачів.

Мідний ферит завдяки регульованим магнітним характеристикам та хорошій хімічній стабільності також є привабливим матеріалом для індуктивного нагріву з потенційним застосуванням для магнітної гіпертермії. Ефективне теплоутворення вимагає делікатного балансу між магнітними характеристиками, структурними особливостями та колоїдною стабільністю дисперсій наночастинок, що буде визначати їх подальший біорозподіл, утримання та однорідність нагрівання. Включення тривалентного неодиму може викликати зміни в розподілі катіонів, кристалічній симетрії та поверхневому заряді, тим самим впливаючи як на магнітні, так і на колоїдні характеристики системи.

Попри значний прогрес у вищевказаних напрямках наукового пошуку, залишаються проблеми пов'язані із обмеженим прогностичним контролем над ефектами допущання, недостатньо вивченими шляхами деградації органічних забруднювачів включно із їх комбінаціями в реакційних сумішах, відсутністю всебічного розуміння синергетичного впливу магнітних характеристик та колоїдної поведінки композитних шпінельних систем на ефективність індукційного нагрівання, а також бар'єри для промислового масштабування. Тому, пошуки та модифікація нових методів синтезу, дослідження структури, морфології, фізико-хімічних та функціональних характеристик матеріалів з покращеними каталітичними та терромагнітними властивостями є ключовим завданням сучасної науки в сферах каталізу і магнітної гіпертермії на вирішення якого спрямована дана робота. Таким чином, дослідження є своєчасним і відповідає сучасним викликам науки та суспільства, спрямованим на розвиток екологічно безпечних і високотехнологічних матеріалів нового покоління.

2. Зв'язок з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконана у наукових лабораторіях кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Карпатського національного університету імені Василя Стефаника у рамках наукових досліджень кафедри прикладної фізики і матеріалознавства.

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Основні ідеї, наукові положення та теоретичні висновки дисертації сформовані авторкою особисто. Напрацювання, що належать співавторам, у роботі не використовувалися.

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації: полягає в тому, що матеріали і висновки можуть бути використані у науково-дослідницькій роботі. Досліджені матеріали можуть слугувати для подальшого вивчення та пошуку нових методів отримання та використання вискоефективних

функціональних композитів на основі феритів із шпінельною структурою, зокрема в сферах фотокаталізу та магнітної гіпертермії. Також отримані результати можуть бути інтегровані у навчальні курси з матеріалознавства, фізики твердого тіла та нанотехнологій, медичної та біологічної фізики, а також використані при підготовці магістерських і дисертаційних робіт у галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації зумовлений поставленими завданнями та результатами їх розв'язання. У роботі:

- вперше запропоновано одностадійний спосіб формування дво- та трикомпонентних гетеропереходів (Тип-II) з каскадним розташуванням енергетичних зон типу $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ та $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ шляхом модифікації умов методу золь-гель автоспалювання (pH реакційного середовища, стехіометрія прекурсор/хелат, включення легуючої домішки Nd та температура і тип атмосфери постсинтезного відпалу);

- встановлено фізичні закономірності формування структурно-фазового стану нанокompозитів на основі Nd-вмісного фериту міді за умови дефіциту хелатуючого агента та запропоновано відповідний механізм розвитку в процесі дендритного росту макропористої губчастої морфології нанокompозитів, основним елементом яких є сферичні наночастинки (~20-30 нм) домінуючої фази шпінелі декоровані поверхневими nanoострівцями ініційованих фаз оксиду міді (II) та делафоситу;

- вперше встановлено синергетичне підсилення фотокаталітичної активності подвійних гетеропереходів $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ з як прояв таких конкуруючих впливів як формування і оптимізація каскадного розташування енергетичних зон, мінімізація розміру їх нанокристалів, ініціація оптимального вмісту фази оксиду міді та величина і знак потенціалу поверхні каталізатора, що визначає як швидкість перебігу реакції фотодеструкції так і її тип в залежності від природи полютанта;

- вперше для модельної катіон-аніонної суміші за умови позитивного поверхневого дзета-потенціалу трикомпонентних фотокаталізаторів типу $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ встановлено високосинхронний характер багатоцентрового фотокаталізу окремих складових барвників із спільним механізмом їх фотодеструкції як цілісного супрамолекулярного комплексу;

- вперше встановлено високу ефективність термомагнітного відгуку для нанокompозитів $\text{CuFeO}_2/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ та $\text{CuO}/\text{CuFeO}_2/\text{CuNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ в колоїдних системах індукційного нагріву з досягненням значень $\text{SAR} > 33 \text{ Вт/г}$ та $\text{ILP} > 0,16 \text{ нГн} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ як прояв синергетичного ефекту взаємного підсилення таких факторів як максимальна намагніченість, висока анізотропія, колоїдна стабільність, максимальні значення дзета-потенціалу, розмірний ефект та помірний час релаксації Нееля, що демонструє їх потенціал для біомедичних застосувань.

6. Використання (апробація) результатів роботи.

Представлені в дисертаційній роботі результати були оприлюднені та обговорювалися на: 10th jubilee International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2022) (Lviv, Ukraine, 2022); XIX International Freik Conference "Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems" (ICPTTFN-XIX) (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2023); XVI Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków (Rzeszow, Polska, 2023); International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2023) (Bukovel, Ukraine, 2023); 2024 IEEE 14th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2024) (Riga, Latvia, 2024); 2025 IEEE 15th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2025) (Bratislava, Slovakia, 2025); XX International Freik Conference "Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems" (ICPTTFN-XX) (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2025); International workshop for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications" (Lviv, Ukraine, 2025); International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2025) (Bukovel, Ukraine, 2025).

Окремі положення дослідження обговорювалися на щорічних звітних наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і докторантів Карпатського національного університету імені Василя Стефаника (2021-2026 рр.).

7. Особиста участь автора – одержання наукових та практичних результатів, що викладені в дисертації.

Дисертація виконана на кафедрі прикладної фізики і матеріалознавства.

Робота є результатом самостійних досліджень Мокляк Марії Геннадіївни.

8. Перелік публікацій за темою дисертації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі:

- 8 статей у фахових наукових журналах, які індексуються наукометричною базою Scopus;
- 2 матеріалів конференцій у збірниках, які індексуються наукометричною базою Scopus;
- 9 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій;
- 1 патент України на корисну модель.

Публікації, що індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Moklyak, V., Chelyadyn, V., Hrubciak, A., Ostafychuk, B., Kotsyubynsky, V., Mizilevska, M., **Moklyak, M.**, Lisovsky, R., Yavorskyi, Y. (2020). Synthesis, structure, optic and photocatalytic properties of anatase/brookite nanocomposites. *Journal of Nano Research*, 64, 39-48. (SCOPUS, Q3).

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.64.39>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85097368967>

2. Bazaluk, O., Hrubciak, A., Moklyak, V., **Moklyak, M.**, Kieush, L., Rachiy, B., Gasyuk, I., Yavorskyi, Y., Koveria, A., Lozynskyi, V., Fedorov, S. (2021). Structurally dependent electrochemical properties of ultrafine superparamagnetic 'Core/Shell' γ -Fe₂O₃/Defective α -Fe₂O₃ composites in hybrid supercapacitors. *Materials*, 14(22), 6977. (SCOPUS, Q2).

DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14226977>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85119717776>

3. Hrubciak, A., Moklyak, V., Yavorsky, Y., Onuskiv, B., Chelyadyn, V., Karpets, M., **Moklyak, M.**, Ivanichok, N., Ilnitsky, N. (2022). Electroconductive properties of carbon biocomposites formed by the deposition method. *Physics and Chemistry of Solid State*, 23(2), 302-310. (SCOPUS, Q4).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.2.302-310>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85133689472>

4. Mazurenko, J., Kaykan, L., Sijo, A. K., Moiseienko, M., Kuzyshyn, M., Ostapovych, N., & **Moklyak, M.** (2023). The influence of reaction medium pH on the structure, optical, and mechanical properties of nanosized Cu-Fe ferrite synthesized by the sol-gel autocombustion method. *Journal of Nano Research*, 81, 65-84. (SCOPUS, Q3).

DOI: <https://doi.org/10.4028/p-d2fQaH>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85182978353>

5. Mazurenko, J., Kaykan, L., Moklyak, V., **Moklyak, M.**, Moiseienko, M., Ostapovych, N., & Petryshyn, M. (2025). Inductive Heating Behavior of Copper Ferrite Magnetic Nanoparticles. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(2), 312-321. (SCOPUS, Q4).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.312-321>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105011090173>

6. **Mokliak, M.**, Kaykan, L., Mazurenko, J., Moiseienko, M., Kuzyshyn, M., Dovbnia, I., Ilnitsky, N., Yuryev, S., Mokliak, V. (2025). Influence of Neodymium Doping on the Thermomagnetic Response and Colloidal Behavior of Copper Ferrite Nanoparticles. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(3), 564-577. (SCOPUS, Q4).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.564-577>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105018688214>

7. **Mokliak, M.**, Ilnitskyi, R., Kaykan, L., Mazurenko, Y., Turovska, L., Moiseienko, M., Mokliak, V., Sheketa, V. (2026). Neodymium Doped Copper Ferrite Nanocomposites as an Effective Magnetic Catalyst for the Organic Dyes Decomposition. *Physics and Chemistry of Solid State*, 27(1), 215-225. (SCOPUS, Q4).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.27.1.215-225>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105034919269>

8. Mazurenko, J., Turovska, L., **Moklyak, M.**, Kaykan, L., Moklyak, V. (2026). Synthesis, Challenges, and Application Potential of Copper Ferrite Nanoparticles. *Physics and Chemistry of Solid State*, 27(2), 284-298. (SCOPUS, Q4).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.27.2.284-298>

URL: <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/pcss/article/view/10471>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на конференціях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах):

9. Mazurenko, J., Kaykan, L., **Moklyak, M.**, Bandura, K., Gondek, L. and Żywczak, A. Magnesium Substituted Copper Ferrite as an Effective Catalyst for the Organic Dyes Decomposition. *Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) : 2024 IEEE 14th International Conference*, Riga, Latvia, 2024. P. 1–4. (SCOPUS).

DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.10739689>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85212241932>

10. Mazurenko, J., Kaykan, L., Michalik, J. M., Szostak, E., **Moklyak, M.** and Mazurenko, O. Influence of Rare Earth Substitution on the Photocatalytic Efficiency of Spinel Ferrite Nanoparticles. *Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) : 2025 IEEE 15th International Conference*, Bratislava, Slovakia, 2025. P. NEE09-1–NEE09-6. (SCOPUS).

DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP68437.2025.11216285>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105023659771>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на конференціях та патент України на корисну модель):

11. Hrubciak A. B., **Moklyak M. G.**, Chelyadyn V. L. Structurally dependent electroconductivity properties of ultrafine composites α -FeOOH/ α -Fe₂O₃. *Nanotechnologies and Nanomaterials (NANO-2022) : 10th jubilee International Conference*, 25–27 August 2022, Lviv, Ukraine. P. 37.

URL: https://drive.google.com/file/d/1-tx2qcGzZI_LxqaHsVAfHTmc6MqzA8Hs/view?usp=drive_link

12. **Moklyak M. G.**, Hrubciak A. B., Moklyak V. V., Ostafyichuk B. K. Electrochemical Properties of Carbon Biocomposites. *Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems : XIX International Freik Conference*, 9–14 October 2023, Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 49.

URL: https://drive.google.com/file/d/1mJO21SzXGLGE7GgrCKv5ZNlomT--0lc/view?usp=drive_link

13. **Moklyak M.**, Mazurenko J., Bandura K., Turovska L., Vytvytskyi A. The Role of Hydrogen Peroxide in the Photocatalytic Process of Dye Removal from an Aqueous Environment Under the influence of Visible Light. *XVI Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków*, 2 czerwca 2023, Rzeszow, Polska. P. 28.

URL:

https://drive.google.com/file/d/18EQxEb2uD9zkVss5Y9sj5vlbjGpuJTQN/view?usp=drive_link

14. **Moklyak M.**, Mazurenko J., Kaykan L., Moklyak V. Effect of Post-Synthesis Annealing Temperature and Chelating Agent on Photocatalytic Properties of Nanosized Copper Ferrite. *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2023) : International research and practice conference*, 16–19 August 2023, Bukovel, Ukraine. P. 62.

URL:

https://drive.google.com/file/d/18BYtMVCtC2KZFetuRQ5lJ7okV4sPobEA/view?usp=drive_link

15. Ivanichok N. Y., Rachiy B. I., **Mokliak M. G.**, Lysiv T., Mokliak V. V. Obtaining activated carbon from biomass by thermal activation. *Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems : XX International Freik Conference*, 6–10 October 2025, Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 151.

URL: https://drive.google.com/file/d/18Lf05QCSDtSPz_XSILHB_dvd-iqpecFU/view?usp=drive_link

16. Mokliak V. V., Chelyadyn V. L., Halushchak M. O., **Mokliak M. G.** Structural stability of lithium battery cathodes based on core (α -Fe₂O₃) - shell (γ -FeOOH) nanocomposites. *Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems : XX International Freik Conference*, 6–10 October 2025, Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 157.

URL: https://drive.google.com/file/d/1b_s-VOGlQRwk26hOeLLC3Lusu-2kwsr1/view?usp=drive_link

17. **Mokliak M. G.**, Mazurenko J. S., Kaykan L. S., Mokliak V. V. Structural and optical studies of nanocomposites based on Nd-substituted copper ferrite. *Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems : XX International Freik Conference*, 6–10 October 2025, Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 213.

URL: https://drive.google.com/file/d/1oVirxCe7ed6tq1tld4cs3tO-8LpaIeY9/view?usp=drive_link

18. Dovbnia I., **Mokliak M.**, Moiseienko M., Ostapovych N. Design and evaluation of Nd-doped copper ferrite nanoparticles for biomedical hyperthermia. *Functional materials for technical and biomedical applications : International workshop for young scientists*, October 14-16, 2025, Lviv, Ukraine. P. 6.

URL: https://drive.google.com/file/d/1_z5qnGonKaEsorn7YLYETH-PmGPMF11H/view?usp=drive_link

19. **Mokliak M.**, Kaykan L., Mazurenko J., Mokliak V. The Effect of Neodymium Ions Substitution on the Structure and Elastic Properties of Copper Ferrites. *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2025) : International research and practice conference*, 20–23 August 2025, Bukovel, Ukraine. P. 482.

URL:

https://drive.google.com/file/d/1m3F2Fw6GZXaPOE8Tk7XPGjb6Gd5Gxj1U/view?usp=drive_link

20. Спосіб отримання фотокаталізатора на основі нанорозмірного мідного фериту для очищення води від органічних барвників : пат. 163225 Україна : B01J 23/70, C02F 103/14. № u 2025 06397 / Мазуренко Ю. С., Кайкан Л. С., Туровська Л. В., Мокляк В. В., **Мокляк М. Г.**, Мазуренко О. О. ; заявл. 19.12.2025 ; опубл. 03.06.2026, Бюл. № 22. 4 с.

URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1927021/>

9. Наукове значення виконаного дослідження

Встановлені закономірності впливу катіонного заміщення (Nd^{3+}) на фазову стабільність, катіонний розподіл та мікроструктурні параметри створюють основу для цілеспрямованого регулювання магнітних, електронних та оптичних властивостей феритів, що дозволяє обирати оптимальний склад матеріалу та формувати дизайн наноферитів відповідно до вимог конкретного застосування. Виявлені зв'язки між функціональними властивостями (фотокаталітична активність, термомагнітний відгук) та фізико-хімічними властивостями досліджуваних матеріалів відкривають можливості для застосування їх у сферах екологічних технологій та біомедичних застосувань.

10. Практична цінність результатів дослідження

Результати дисертації можуть бути основою для подальших наукових досліджень та розробки нових функціональних матеріалів на основі феритів із шпінельною структурою. Розроблені оптимізовані модифікації методу золь-гель автоспалювання з урахуванням вибору хелатуючого агента, регулювання рН середовища та температурно-часових параметрів відпалу можуть бути використані як технологічна база для відтворюваного отримання наноструктурованих феритів із прогнозованими характеристиками. Результати дисертації можуть мати важливий внесок у розвиток нових енергоефективних технологій синтезу поліфункціональних композитних матеріалів на основі феритів різного катіонного складу. Представлені в роботі підходи та методи можуть бути використані (і вже частково використовуються) при навчанні студентів природничих та технічних спеціальностей.

11. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

За результатами фахового семінару зроблено висновки:

1. Дисертація Мокляк Марії Геннадіївни на тему «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні властивості нанокompозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне наукове завдання, а саме: встановлено фізичні закономірності формування структури, фазового стану та катіонного розподілу у наноструктурованих феритах міді та Nd-вмісних нанокompозитах на їх основі, синтезованих методом золь-гель

автоспалювання, та досліджено їх вплив на магнітні, електронні, оптичні та функціональні властивості в каталітичних системах очищення води і колоїдних системах індукційного нагріву, що має важливе значення для галузі знань 10 Природничі науки.

2. За темою дисертації опубліковано 20 наукових публікацій, де в значній мірі відображені основні результати дисертації, з них 8 публікації у журналах, які індексуються наукометричними базами Scopus, 2 матеріалів наукових конференцій, які індексуються наукометричними базами Scopus, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 1 патент України на корисну модель.

3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. (зі змінами) «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

4. Рекомендувати дисертацію «Синтез, структура, каталітичні та термомагнітні властивості наноккомпозитів на основі Nd-вмісного мідного фериту», подану Мокляк Марією Геннадіївною на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали, для подання до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

5. Розглянувши заяви і документи голови, рецензентів і опонентів, та встановивши, що подані документи відповідають вимогам до членів разової спеціалізованої вченої ради згідно Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), пропонувати вченій раді Університету призначити наступний склад разової ради:

Голова ради:

1. Яремій Іван Петрович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

1.1. Boychuk, V., Nykyruy, L., **Yaremiy, I.**, & Husak, V. Cobalt ferrite catalyst in the degradation of caffeine by hydrogen peroxide under induction heating. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2024. 25(4), 885-891.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.885-891>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85214414904?origin=resultslist>

Keywords: caffeine; catalyst; cobalt ferrite; green synthesis; hydrogen peroxide

1.2. Kotsyubynsky, V., Zapukhlyak, R., Boychuk, V., Hodlevska, M., Rachiy, B., **Yaremiy**, I., ... & Hodlevsky, M. Hydrothermally synthesized $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ and $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{porous carbon}$ nanocomposites. *Applied Nanoscience*, 2022. 12(4). pp. 1131-1138.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01773-z>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85103217439?origin=resultslist>

Keywords: Microporous carbon; Nanocomposite; Reduced graphene oxide; Ultrafine copper ferrite

1.3. **Yaremiy**, I., Ostafiychuk, B., Fedoriv, V., Yaremiy, S., & Povkh, M. Influence of stress in epitaxial ferrite-garnet films on the processes of radiation defect formation and low-temperature aging of the ion-implanted layers. *Materials Today: Proceedings*. 2022. 62, pp. 5833-5837.

ISSN: 2214-7853

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.937>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85130440292?origin=resultslist>

Keywords: Epitaxial garnet films; Low-temperature aging; Rocking curve; Rutherford backscattering spectrometry; Strain profiles; Yttrium iron garnet

1.4. Kolkovskiy, P., Rachiy, B., **Yaremiy**, I., Kolkovskiy, M., Kotsyubynsky, V., Bilous, A., ... & Klymkovych, S. Manganese dioxide nanoparticles and nanocomposites with carbon black. Synthesis, physical-chemical and electrical properties. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2024. 32(12), pp. 1151-1161.

ISSN: 1536-383X

DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2024.2382275>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85200052567?origin=resultslist>

Keywords: activation energy; carbon black; electroconductivity; impedance spectroscopy; Manganese dioxide

Рецензенти:

2. Яблонь Любов Степанівна – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики і астрономії Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

2.1. Budzuliak, I. M., **Yablon**, L. S., Budzuliak, I. I., Kotsiubynskyi, V. O., Ilnytskyi, R. V., & Humeniuk, L. M. Structure of titanium dioxide, doped with Zr and Nb. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2026. 27(1), pp. 188-192.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.27.1.188-192>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105034852693?origin=resultslist>

st

Keywords: intercalation; niobium; titanium dioxide; zirconium

2.2. Budzuliak, I. M., **Yablon**, L. S., Ilnytskyi, R. V., Budzuliak, I. I., Ilnytskyi, N. R., Kryvulych, R. I., & Hlubitskyi, A. I. Laser modification of ferrite-garnet films. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2025. 26(1), pp. 174-180.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.1.174-180>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105001687558?origin=resultslist>

st

Keywords: ferrite-garnet films; laser irradiation; magnetic; structural parameters

2.3. Budzuliak, I. M., **Yablon**, L. S., Kotsiubynskyi, V. O., Budzuliak, I. I., Ilnytskyi, R. V., Hlubitskyi, A. I., & Ilnytskyi, N. R. Doping of porous activated carbon with Er, a metal with a high electronic states density. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2024. 25(4), 782-786.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.782-786>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85213238182?origin=resultslist>

Keywords: copper; erbium; high density of electronic states; porous carbon material; specific capacity.

2.4. Budzuliak, I. M., **Yablon**, L. S., Kotsiubynskyi, V. O., Ilnitskyi, R. V., Budzuliak, I. I., Morushko, O. V., ... & Sorohtei, T. R. Phase transitions and guest positions state in the nanodisperse TiO₂ caused by laser irradiation. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2024. 25(3), pp. 520-527.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.520-527>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85207158175?origin=resultslist>

Keywords: anatase; intercalation; laser irradiation; Mössbauer spectroscopy

3. Мандзюк Володимир Ігорович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

3.1. Danyliuk, N., Lapchuk, I., Tatarchuk, T., Kutsyk, R., & **Mandzyuk**, V. (2023). Bacteria inactivation using spinel cobalt ferrite catalyst. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. 24(2), 256-261.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/PCSS.24.2.256-261>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85166519402?origin=resultslist>

Keywords: bacteria inactivation; cobalt ferrite; E. coli; fixed-bed reactor; hydrogen peroxide

3.2. Danyliuk, N., & **Mandzyuk**, V. Hydrogen peroxide decomposition using cobalt ferrite catalyst activated by induction heating. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2023. 766(1), pp. 100-110.

ISSN: 1542-1406

DOI: <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2222256>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85161811380?origin=resultslist>

Keywords: cobalt ferrite; hydrogen peroxide; induction heating

3.3. Danyliuk, N., Tatarchuk, T., Mironyuk, I., Kotsyubynsky, V., & **Mandzyuk, V.** Performance of commercial titanium dioxide samples in terms of dye photodegradation assessed using smartphone-based measurements. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2022, 23(3), pp. 582–589.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.582-589>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85142346506?origin=resultslist>

Keywords: dye; photocatalysis; smartphone-based analysis; titania

3.4. Tatarchuk, T., Danyliuk, N., Shyichuk, A., Kotsyubynsky, V., Lapchuk, I., & **Mandzyuk, V.** (2022). Green synthesis of cobalt ferrite using grape extract: the impact of cation distribution and inversion degree on the catalytic activity in the decomposition of hydrogen peroxide. *Emergent Materials*, 2022. 5(1), pp. 89-103.

ISSN: 2522-5731

DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00323-1>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85118552386?origin=resultslist>

Keywords: Catalyst; Cobalt ferrite; Grape extract; Green synthesis; Hydrogen peroxide

3.5. Danyliuk, N., Lischynska, S., Tatarchuk, T., Kotsyubynsky, V., & **Mandzyuk, V.** Magnetite nanoparticles synthesized using grape fruit extract: synthesis, morphology, hyperthermia application and catalytic activity in hydrogen peroxide decomposition. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2022. 23(1), pp. 77-88.

ISSN: 1729-4428

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.1.77-88>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85129649829?origin=resultslist>

Keywords: catalytic activity; green synthesis; hydrogen peroxide; magnetic hyperthermia; magnetite

Опоненти:

4. Лень Євген Георгійович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу електронної структури та електронних властивостей Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

4.1. Yakymchuk, M. M., Mykhailova, H. Y., Galstian, I. Y., Gerasymov, O. Y., Shatnii, T. D., Rud, M. O., & **Len, E. G.** Structure and Electronic Properties of Composite Hydrogenated Titanium-Thermally Expanded Graphite Before and After Vacuum Furnace Annealing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. 45(9). pp. 1041-1066.

ISSN 1024-1809

DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.45.09.1041>

URL:<https://www.scopus.com/pages/publications/85180883453?origin=resultslist>

Keywords: composite material; electrical conductivity; hydrogenated titanium; thermal treatment; thermally expanded graphite; thermophotoemission energy conversion

4.2. Mykhailova, H. Y., **Len, E. G.**, Yakymchuk, M. M., Dekhtyarenko, V. A., Galstian, I. Y., Shevchenko, M. Y., Gerasymov, O. Yu., Tsapko, E. A., Patoka, V. I., & Rud, M. O. Electrophysical Properties of Composites Based on Hydrogenated Titanium with Different Contents of Thermally Expanded Graphite. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2022. 44(11). pp. 1523-1533.

ISSN: 1024-1809

DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.11.1523>

URL:<https://www.scopus.com/pages/publications/85147744376?origin=resultslist>

Keywords: Composite; Electrical conductivity; Hydrogenated titanium; Mechanical properties; Powder materials; Thermally expanded graphite

4.3. Galstian, I. Y., Tsapko, Y. A., Makarenko, O. V., Yampolskiy, A. L., Tarusin, Y. V., & **Len, E. G.** Influence of multi-walled carbon nanotubes in polytetrafluoroethylene on the parameters of electronic structure and absorption of ultra-high-frequency radiation. *Applied nanoscience*. 2023. 13(7). pp.. 4977-4987.

ISSN: 2190-5509

DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02659-4>

URL:<https://www.scopus.com/pages/publications/85140033396?origin=resultslist>

Keywords: Electronic structure; Multi-walled carbon nanotubes; Optical properties of the composites; Positron spectroscopy.

5. Хижун Олег Юліанович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

5.1. Khalameida, S., Samsonenko, M., **Khyzhun, O.**, Sydorchuk, V., Starchevskyy, V., Charnas, B., & Skwarek, E. Sono- and mechanochemical doping of tin dioxide with silver and its physicochemical characteristics and photocatalytic properties: S. Khalameida et al. *Research on Chemical Intermediates*. 2023. 49(1), 121-145.

ISSN 0922-6168

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11164-022-04865-9>

URL:<https://www.scopus.com/pages/publications/85141543196?origin=resultslist>

Keywords: Mechano- and sonochemical doping; Photocatalytic activity; Porous structure; Silver; Tin dioxide.

5.2. Khalyavka, T. A., Shapovalova, M. V., Shcherban, N. D., Shymanovska, V. V., Dulian, P., **Khyzhun, O. Y.**, ... & Tarasov, V. Y. Photocatalytic activity of TiO₂ mechanochemically modified with carbon and/or thiourea under UV and visible

irradiation in the destruction of Safranin T and Rifampicinum. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2022. 135(6), 3393-3409.

ISSN: 1878-5190

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11144-022-02317-4>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85139629647?origin=resultslist>

Keywords: Carbon; Photodestruction; Rifampicinum; Safranin T; Thiourea; Titanium dioxide; Carbon; High resolution transmission electron microscopy; Irradiation; Nitrogen; Particle size; Particle size analysis; Photocatalytic activity; Photodegradation; Powders; Reusability; Scanning electron microscopy; X ray photoelectron spectroscopy; X ray powder diffraction.

5.3. V. Sydorchuk, V. Vasylechko, G. Gryshchouk, N. Shcherban, S. Khalameida, Ya. Kalychak, O. **Khyzhun**, O. Synelnychenko, L. Vasylechko, M. Kuśmierz, B. Charmas. Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Over Clinoptilolite Modified with Transition Metals. *Journal of Cluster Science*. 2025. 36(2), 48.

ISSN 1040-7278

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10876-025-02765-7>

URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85218236572?origin=resultslist>

Keywords: Band gap; Clinoptilolite; Photocatalytic degradation; Sorbed cations

Голова фахового семінару

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри прикладної фізики
і матеріалознавства



Володимир КОЦЮБІНСЬКИЙ

Секретар фахового семінару

доктор фізико-математичних наук,
професор, професор кафедри прикладної
фізики і матеріалознавства



Богдан РАЧІЙ

04 червня 2026 р.